



VNIVERSITAT DE VALÈNCIA

TESIS DOCTORAL

Patrones de distribución espacial y respuesta hidrológica de los componentes superficiales del suelo como control de la escorrentía superficial en condiciones ambientales mediterráneas

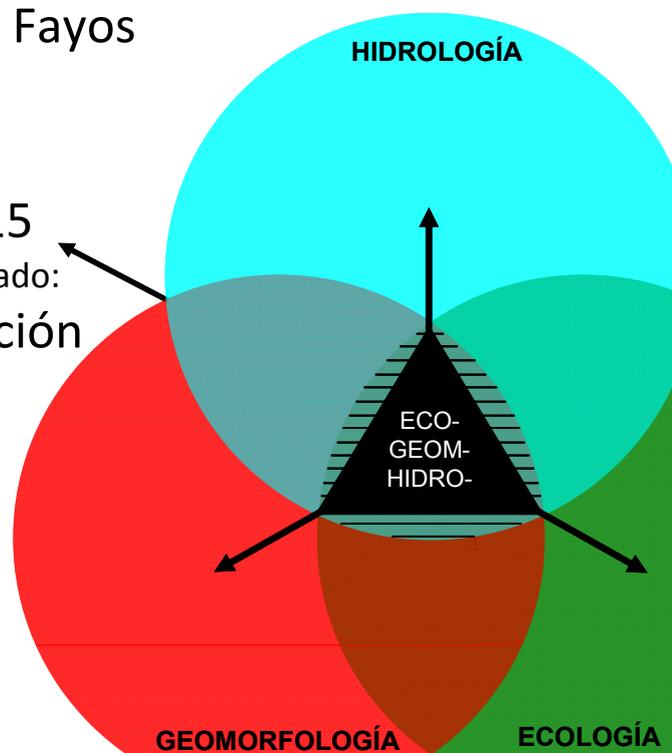
Eva Arnau Rosalén

Directores:

Dr. Adolfo Calvo Cases

Dra. Carolina Boix Fayos

Valencia, 2015
Programa de doctorado:
115 Desertificación



*Porque a mí la escorrentía...
me importa lo que a tol mundo.
teva*

AGRADECIMIENTOS

La realización de esta tesis sólo ha sido posible bajo la inestimable supervisión de mis dos directores, Adolfo Calvo y Carolina Boix, que durante todos estos años me han brindado todo el apoyo y el saber hacer necesario para su consecución. Agradecerles especialmente la oportunidad y confianza depositada en mí para el desarrollo de buena parte las ideas de su línea de investigación fruto de su trabajo conjunto, por las que en todo momento me he sentido responsable de llevar a buen puerto. Además debo de reconocerles el esfuerzo de paciencia suplementario por las condiciones de realización de esta tesis que, sin una fuente de financiación directa, la han dilatado en el tiempo hasta su finalización. Ambos me han proporcionado semejante espacio de libertad que me ha permitido desplegar todo mi potencial creativo, tanto en la parte de búsqueda de nuevos caminos de análisis, como incluso de representación gráfica, tanto de cuestiones conceptuales como de síntesis de resultados. Pero quizás si algo sintetiza la dinámica de todos estos años es el hecho de que si empezamos este recorrido siendo amigos, lo acabamos siéndolo todavía mejores y además colegas, lo que sin duda supone para mi un enorme privilegio.

Mi acercamiento a la ciencia, y por tanto al intento de comprensión de este mundo complejo, ha venido además de otros caminos alternativos. Lorenzo Ferrer (ya en un merecido descanso en paz) y Antonio Caselles, gracias, por aquellas horas, extrañas, matemáticas, pero ante todo sugerentes bajo el amparo de DIOS (*Diploma de Investigación Operativa y Sistemas*), y también del irremediable caos (certificado de *Introducción al Pensamiento Sistémico. Sistemas Complejos: Orden y Caos*). Tras todo eso, los sistemas nunca volvieron a ser los mismos para mí. A vosotros os dedico la figura 1.12. Variopintos compañeros de hazaña también disfruté aunque sus nombres se difuminan ya en mi memoria, Lena, Abogado, pinturas Pinay, Alcoiano, vendedor de naranjas, y todo un ejército de altos mandos llegando hasta Portugal. ¿Algún día las trayectorias caóticas en continua bifurcación conseguirán reunirnos en un nuevo estado de fase? Amén.

Antes de eso, fueron el también variopinto equipo docente del departamento de Geografía quien empezó a hacer de mi lo que hoy haya podido llegar a ser en el entorno de la disciplina que nos ocupa. Bienvenida la heterogeneidad. Cuatro áreas o fuentes de conocimiento encontré allí: Física, Humana, Regional.. y las salidas de campo. Y acabó siendo la Geomorfología quien consiguió ablandarme las neuronas. Y esto que aquí presento es el caldo resultante. No sin antes una lista de los cocineros de la física: Adolfo, Pílares, Fumanal y Carmona, Alejandro Pérez Cueva, Neus la Roca, Michele Dupree, Paquita Segura, Carles Ferrer, Eulalia Sanjaume, Joan Mateu, Vicent Roselló. Ya fuera de las aulas M^a José López y Ana Camarasa. De todos sin excepción guardo algún que otro conocimiento a buen recaudo. Gracias. De los no-físicos sería extender en exceso este listado, pero también gracias porque con los unos y los otros es como llegué a la Geografía. Aunque voy a

permitíós el lujo de saber de otro de los que fueron inmensos para mí: Josep M. Bernabé, visor generalista donde los hubo. Gracias por tus clases, gracias por *criar* al Adolfo pre-doctoral tan/mbién.

Mi temprana primera escapada de los muros de la facultad fue para adentrarme en los del CIDE (Centro de Investigación sobre la Desertificación), es su época en Albal. De su magnífico recibimiento como estudiante en prácticas guiada por Carlos Añó y Antonio Pascual, rasqué algún tiempo más como invitada de colaboración, y luego además cursé su programa de doctorado de Desertificación, lo que me permitió conocerlos a todos todavía mejor. A los de arriba: Juan Sánchez, Vicente Andreu, Luis Recatalá, Carmen Antolín, Eugenia Gimeno, recuerdo a un Ramón, Florencio Ingelmo, Patricio García-Fayos, Sabina Asins. Y a los de abajo: Marta, Ferrán, Oscar, Fela, Mónica, etc. Gracias por la primera presentación en este mundillo.

Le llega el turno a mis estancias en el extranjero sin siquiera haber salido de las paredes de la facultad. Elias Symeonakis (junto a Athena), alias el *griego*, e Iztik Katra, sin alias, pero de ese lugar al que hoy se le llama Israel. Ambos postdoctorales que se pasaron una temporada por el despacho de geografía, donde pasé la mitad de la vida de esta tesis. Mis primeros referentes de *high quality* doctoral recién salidos del horno. Ninguno llegó con sed de publicar. Ambos llegaron con ansias de conocer. Gracias por ese mensaje. Elias todavía no se ha librado de mí, y espero que por muchos años.

Sin embargo para mí estancia en el *intra-extranjero* ya sí viajé a Murcia. Donde Carolina me abrió las puertas de la ciencia institucional, el CSIC, del CEBAS (Centro de Edafología y Biología Aplicada del Segura) concretamente. Allí disfruté por fin de compañía grupal: Lucía, Jose, Querejeta, María, Antonio, etc. También tuve el gusto de conocer a parte de la bibliografía: María Martínez Mena, Víctor Castillo y Juan Albadalejo. Gracias a todos por el recibimiento. Fue un chorro de aire fresco sin duda. Jorge también estaba allí.

Jorge realmente nunca se ha ido, y es que siempre ha estado ahí. En las aulas de Geografía; en el seminario de Almería; en Cocoll, Benidorm y Salmorreta; en el programa de Desertificación hasta el DEA; en los primeros congresos; en ese despacho de la facultad; en Murcia de anfitrión; me llevó a Marruecos y a Perú, y creo que también a la Manga del Mar Menor; y ya luego en las tecnologías de la teleconexión. Pero yo también estuve allí, el día que ascendió a doctor. Gracias por acabar, y demostrarme que sí se podía, y que a pesar del tiempo todavía no era la fecha de caducidad. No voy a reprocharte pues que no me esperaras. No me reproches tú que yo no llegase a tiempo para leer el mismo día. Y en este mismo párrafo he de agradecerle a Alberto también todo el tiempo que estuvo a nuestro lado compartiéndolo todo. Sin ti nada hubiese sido igual para mí. Gracias por ayudarme a *despegar* a teva como compañero incondicional, de campo, despacho con BSO, pero sobre todo de conversaciones de la simple existencia. Y por enseñarme a conducir el coche, la bici tuviste menos suerte. Tú me descubriste el extranjero Manchester, al que paradójicamente quizás retorne con Elias. Ojalá sigas atareado como gato en matanza. Arrivederci.. Pino!

Remontándome a mis inicios, he de citar, aunque sea brevemente a Montse y familia. Con quien me crié hasta que esto empezó. Y justo antes de acabar la reencontré, para hacerlo hasta conmigo misma fuera de la factoría de estas páginas. Y seguimos siendo quienes éramos, sólo que una versión ampliada y mejorada. Gracias a ti por la perspectiva de vida que me has dado.

Ahora a la mamá y al papá (Dolores y Antonio). Sin ellos nada de esto existiría: verdadera materia prima, y aunque esté feo que yo lo diga, de extremada calidad. Verdaderos también inspiradores de la libertad en la que siempre he intentado moverme. Libertad de acción: esa fue la educación que me dedicaron desde niña, pero también significa las condiciones que han podido propiciarme para mantenerla. Ellos técnicamente me hicieron, y además lo hicieron libre. Supongo que la *akracia* es pues mi máspreciado legado familiar. Nadie ha inventado todavía la palabra lo suficientemente grande y proporcional para agradecer todo lo que a ellos les debo. Y esta tesis si se ha alimentado de algo, ha sido precisamente de todo lo que ellos me han dado en esta vida, valga la redundancia.

Cierro el apartado de una patria para entrar en mi otra: el Paraíso de teva. Y con eso quizás estaría todo dicho. Pero todo paraíso parece debe tener un testamento. Aunque este sin duda más cercano de la Bibliografía que de la Biblia.

Si bien esta tesis no ha disfrutado de una vía de financiación directa, en Almería se me abrieron sucesivas oportunidades de trabajo relacionadas con el mundo de la investigación pudiendo así compaginar ambas facetas, la laboral y la de realización de la tesis. Facetas que se han retroalimentado en un propicio espacio de sinergia mutua. Y ese valor añadido al que me refiero surge de mi inmersión en el grupo de Desertificación y Geo-ecología de la Estación Experimental de Zonas Áridas (EEZA-CSIC) en estrecha colaboración con algunos destacados *ejemplares* de la Universidad de Almería (UAL) y con el Centro Andaluz para la Evaluación y Seguimiento del Cambio Global (CAESCG).

Roberto Lázaro, con su PECOS y su PREVEA, le devolvió la vida a teva en Almería. Pero todo paraíso debe ser descubierto antes, y Roberto y Monigue fueron la antesala de todo lo que luego vino después. Ellos me enseñaron toda la *filosofía* vegetal que hoy sé. Largas conversaciones a dos y/o a tres, en largas y extremas sesiones de Balsa Blanca adorando a un único instrumento y construyendo un *parcelario*. Roberto en definitiva fue el jefe perfecto, y Monigue la compañera ideal.

La continuación de mis oportunidades allí llegó después de la mano de Paco Domingo, junto a Cecilio Oyonarte, y relacionado con su colaboración con Hermelindo Castro y Javier Cabello en el marco del GLOCHARID. Gracias por la confianza depositada en mí, y en especial por la flexibilidad que siempre me otorgaron. También fue un placer trabajar para Paula en esa fase. Ya les perdí de jefes, pero les conservo de buenos amigos. Quizás algún día no muy remoto consiga llamarles colegas.

En la élite de los de Almería de Arriba evidentemente hay más: Juan Puigdefàbregas, Yolanda Cantón, Albert Solé y Gabriel del Barrio. Junto evidentemente a los ya citados Roberto Lázaro, Paco Domingo y a otros ingredientes básicos, Alfredo Durán, Pepa Moro, Marieta, Sebastián Vidal, Alberto y Ramón. Y me estoy limitando a citar al *dream team* de origen. Al que yo he podido conocer, y germen de todo lo que allí he vivido y disfrutado, y de lo que todavía hoy allí continua.

Sony pululó pronto, pero no sé qué pudo pasar que tardé tanto en verla, ¡bien vista! *A matter of scale?* Y es que lo verdaderamente gigantesco necesita su *time*, supongo. Y como con las grandes desgracias, no llegó sola. Trajo a Emilio y a Vero, genética de alto *standing*, desde la cabeza a los pies, pasando por los bolsos. Yolanda la gran responsable de mucho, lo que precisa de un enorme reconocimiento por su gran esfuerzo y dedicación. En lo profesional también, ya lo he dicho más arriba.

Tisa & Otxoa y Patr&Ingo fueron la *terreta* que también se puso a mi disposición en el Paraíso. Importante, porque entre nosotros siempre pudimos el mismo idioma.

A Paula, con quien tengo todavía un gran sistema pendiente por arreglar, no sin antes comprenderlo en toda su abstracción.

Al TUPPER, que fueron algunos de los de antes más JuanMi, Patricia, Andrés, JoseLuis, Olguita, Ángela, María, Ismael, Mar, Josema, etc. Significan sobremesas cargadas de contenido, y los jueves, también lo solían ser de azúcar. Que aproveche.

Todos los de ahí arriba han contribuido en algún sentido a que teva esté hoy entre tus manos de la manera en que se presenta. Pero todo proceso se nutre también de hitos: pre-navidades de 2013. Algún día releeré mil y una vez cada uno de esas decenas de e-mails. Como algún día supongo que volveré al Pimienta Rosa, ojalá que con los mismos, incluso los que faltaron ese día. Un capítulo importante, además del 7 de Rayuela. Creo que debería ensayarlos para esa próxima vez.

Y para ir acabando, retorno a Adolfo y Carolina, por ser la semilla, y también la piel que la recubre, ejerciendo de límite, además de protección. Piel a la que han sabido sacar brillo para el momento de su presentación en público. Y estoy pensando en una manzana, de la que todavía tengo la esperanza que muchos acaben mordiendo. Pues esa seguro es la finalidad de toda cosecha, especialmente de las manzanas criadas en el Paraíso. Elinor, alias *teli* es la primera víctima, o comensal, según se mire.

Se podría decir que esta manzana ha sido prácticamente fabricada en cautividad. Sólo sé de una importante segunda excepción. De alguien en principio ajeno que supo, o quiso o estuvo dispuesto al sacrificio de acercarse lo suficiente para poder ayudarla a crecer desde fuera, esta vez hasta su *aterrijaje*. Y *desde fuera* significa casi a ciegas, pero lo consiguió. Siempre. Lo hace con todo aquel que le necesite. Así que gracias por sacar tiempo también para teva. Y yo me pregunto ahora, ¿qué pasaría si para teva2 necesitase algo más que a un casi ciego? Podría regalarle un reloj todavía más grande del que ya tiene, ¿por que no es de ahí de donde se supone la gente sacamos todo nuestro tiempo?

Se dice por ahí que más de 10 es vicio, y teva ya podría contar mínimo los 11 años. Así que ahora que la acabo es ya sólo para continuar. ¿Por que qué más puedo hacer?, ¿si ya es vicio? Pero desde ahora el reto seguirá siendo el mismo: la CONECTIVIDAD. Que acabe por fin con la cautividad. Dicho esto, pasen y vean, continúen leyendo para intentar comprender lo que ahí está escrito y dibujado. Pues el verdadero cuento chino espero no haya hecho más que comenzar...

INDICE

RESUMEN	13
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	17
1.1 ESTADO DE LA CUESTIÓN	17
1.1.1 Mecanismos básicos de generación de escorrentía in situ (point-scale)	18
1.1.2 Factores control de la infiltración	19
1.1.3 Concepto de Componente Superficial del Suelo (CSS): unidad de respuesta hidrológica	21
1.1.4 Modelo conceptual de generación de escorrentía: discontinuidad por infiltración	22
1.1.5 Funcionamiento hidrológico general del sistema	23
1.1.6 Funciones hidrológicas transferidas al eco-geo-sistema	27
1.2 NUEVOS RETOS Y APROXIMACIONES METODOLÓGICAS	34
1.2.1 Características clave del sistema como premisas fundamentales de trabajo: lecciones aprendidas	36
1.2.2 Marco metodológico de aproximación de los nuevos retos	37
1.3 JUSTIFICACIÓN Y MARCO DE TRABAJO DE LA PRESENTE TESIS	41
CAPÍTULO 2. ÁREAS DE ESTUDIO: DINÁMICA DE PROCESOS EN EL GRADIENTE DE SUBAMBIENTES.	47
2.1. CONTEXTO GEOLÓGICO Y GEOMORFOLÓGICO	49
2.2. CARACTERÍSTICAS CLIMÁTICAS GENERALES	53
2.3. VEGETACIÓN: DESCRIPCIÓN BIOGEOGRÁFICA	53
2.4. SUELOS: CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y QUÍMICAS DE LOS SUELOS	54
2.5. USOS DEL SUELO	56
CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA	59
3.1. PATRONES DE DISTRIBUCIÓN DE COMPONENTES SUPERFICIALES DEL SUELO (CSS).	61
3.1.1. Adquisición de imágenes y construcción del foto-mosaico	62
3.1.1.1. Procedimientos en campo	63
3.1.1.2. Reconstrucción del mosaico de imágenes	65
3.1.2. Cartografía de componentes superficiales del suelo (CSS)	65
3.1.2.1. Leyenda de la cartografía	66
3.1.2.2. Criterios de fotointerpretación de los CSS	69
3.1.3. Herramientas de análisis de la distribución de componentes superficiales del suelo: Análisis de patrones	71
3.1.3.1. Análisis de diversidad	73
3.1.3.2. Identificación de patrones a escala de ladera	75
3.1.3.3. Dinámica de distribución de CSS relacionada con procesos hidro-geomorfológicos: blindaje superficial como control	79

3.2.	MEDICIÓN DE LA ESCORRENTÍA Y MOVILIZACIÓN DE SEDIMENTOS	81
3.2.1.	Experimentos de simulación de lluvia en CSS: escala de micro-parcela	82
3.2.2.	Monitorización de la escorrentía y movilización de sedimentos en condiciones de lluvia natural: escala de parcela	83
3.2.2.1.	Instrumentación y colección de datos	83
3.2.2.2.	Análisis de la serie histórica de datos	88
3.3.	RESPUESTA HIDROLÓGICA DE COMPONENTES SUPERFICIALES DEL SUELO (CSS).....	89
3.3.1.	Sistema de Análisis de datos experimentales de simulación de lluvia	90
3.3.1.1.	Disponibilidad de experimentos de simulación de lluvia (RFS).....	91
3.3.1.2.	Ajuste de la curva de RFS: extracción de los parámetros de Horton	92
3.3.1.3.	Análisis de la respuesta a la escorrentía: efecto LOCAL vs. efecto CSS	92
3.3.2.	Sistema de Asignación de curvas de escorrentía.....	100
3.4.	MODELO DE SIMULACIÓN DE LA RESPUESTA HIDROLÓGICA A ESCALA DE LADERA.....	102
3.4.1.	Modelo de simulación de escorrentía.....	103
3.4.2.	Escenarios de simulación.....	107
3.4.3.	Confirmación del procedimiento de simulación a nivel de proceso mediante parcelas de medida en condiciones de lluvia natural	109

CAPÍTULO 4. PATRONES DE DISTRIBUCIÓN DE COMPONENTES SUPERFICIALES DEL SUELO (CSS) A ESCALA DE LADERA111

4.1.	CARACTERIZACIÓN DE LA HETEROGENEIDAD Y PATRONES A ESCALA DE SITIO: DIVERSIDAD DE CCS Y GRADIENTES DE DISTRIBUCIÓN	114
4.1.1.	Diagnóstico global de las condiciones de blindaje superficial de las laderas	119
4.2.	ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE LA HETEROGENEIDAD A ESCALA DE LADERA: PATRONES DE DISTRIBUCIÓN DE CSS EN RELACIÓN A LOS PROCESOS	122
4.2.1.	Variabilidad transversal vs. longitudinal en la distribución de CSS: test de anisotropía	123
4.2.2.	Caracterización de la heterogeneidad en la composición a escala de ladera: diversidad de CSS en función de la posición en el transecto	124
4.2.3.	Patrones de distribución de CSS: aleatoriedad de la heterogeneidad	127
4.2.4.	Dinámica de distribución de CSS relacionada con procesos eco-hidro-geomorfológicos: Análisis proceso-patrón	132
4.2.4.1.	Caso de Benidorm Sur (BES): extremo semi-árido del gradiente climático. Interpretación geomorfológica.....	133
4.2.4.2.	Caso de Benidorm Norte (BEN): umbría en el semi-árido.	139
4.2.4.3.	Caso de Cocoll Sur (CCS): extremo sub-húmedo del gradiente climático.....	144

CAPÍTULO 5. COMPORTAMIENTO HIDROLÓGICO DE LOS DIFERENTES CSS: ESCALA DE MICRO-PARCELA.....153

5.1.	DISPONIBILIDAD DE EXPERIMENTOS DE SIMULACIÓN DE LLUVIA (RFS).....	153
5.2.	SISTEMA DE ANÁLISIS DE LA RESPUESTA A LA ESCORRENTÍA	155
5.2.1.	Panorama general: efecto LOCAL vs. efecto CSS	155
5.2.2.	Efecto LOCAL (sólo en no-vegetados): carácter del sitio.....	157
5.2.2.1.	Factor pendiente	157
5.2.2.2.	Factor gradiente de exposición de ladera: Norte vs. Sur	159
5.2.2.3.	Factor gradiente de sitio	159
5.2.3.	Efecto CSS: modulación de la respuesta	162
5.2.3.1.	Superficies NO-VEGETADAS	162
5.2.3.2.	Materia seca: Hojarasca y plantas muertas	181
5.2.3.3.	Superficies vegetadas: tipologías de respuesta	184

5.3.	SISTEMA DE ASIGNACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE HORTON	186
5.3.1.	Superficies no vegetadas	187
5.3.2.	Superficies vegetadas	190
5.3.3.	Materia seca: hojarasca y plantas muertas.	191
5.4.	HIDROGRAMAS TIPO PER CSS Y LADERA DE ESTUDIO	194
5.5.	SÍNTESIS DE RESULTADOS	195
 CAPÍTULO 6. INTERACCIÓN ESPACIO-TEMPORAL DE DIFERENTES CSS BAJO CONDICIONES DE LLUVIA NATURAL: ESCALA DE PARCELA (STAND).....		199
6.1	PROPIEDADES DEL SUELO Y COMPONENTES SUPERFICIALES: EFECTOS EN LOS PROCESOS.	199
6.2	CARACTERÍSTICAS DE LA PRECIPITACIÓN	202
6.3	ESCORRENTÍA Y MOVILIZACIÓN DE SEDIMENTO.....	204
6.4	INFLUENCIA DEL TAMAÑO DEL PARCHE O DISTANCIA EN LA MOVILIZACIÓN DE SEDIMENTO.....	205
6.5	CAMBIOS TEMPORALES EN LAS RELACIONES PRECIPITACIÓN-ESCORRENTÍA-MOVILIZACIÓN DE SEDIMENTO.....	208
6.6	DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES	212
 CAPÍTULO 7. RESPUESTA HIDROLÓGICA A ESCALA DE LADERA: MODELIZACIÓN Y PAPEL DE LOS PATRONES DE COMPONENTES SUPERFICIALES DEL SUELO (CSS)		215
7.1	CONFIRMACIÓN DEL MODELO MIXTO DE GENERACIÓN DE ESCORRENTÍA EN BASE A RESULTADOS DE LAS PARCELAS EN CONDICIONES DE LLUVIA NATURAL	218
7.2	MODELIZACIÓN DE LA ESCORRENTÍA A ESCALA DE LADERA SEGÚN EL ESCENARIO DE MODELO MIXTO (ESCENARIO 2): PATRONES TEMPORALES DE EVOLUCIÓN DE LA ESCORRENTÍA	221
7.2.1.	Funcionamiento general del modelo mixto de escorrentía: umbrales de respuesta y mecanismos control	224
7.2.2.	Patrones espaciales de respuesta a escala de ladera	240
7.3.	CONCLUSIONES	248
 CAPÍTULO 8. CONCLUSIONES GENERALES		251
 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS		255

RESUMEN

La respuesta hidrogeomorfológica de las laderas del ámbito mediterráneo (Capítulo 1) se caracteriza por un elevado grado de **complejidad y no-linealidad, como consecuencia de la heterogeneidad** espacio-temporal de algunas propiedades de los suelos, especialmente aquellas que desde su superficie modifican la infiltración del agua. Los ecosistemas muestran, así, un funcionamiento sometido a **umbrales de respuesta**.

En el análisis sistémico de este fenómeno, la **cuestión de escala espacial constituye** un aspecto crucial. Es quizás en, la **escala de ladera** donde existe una comprensión más limitada de los **procesos y formas** que gobiernan su respuesta hidrogeomorfológica. Esto es resultado de la mayor atención prestada por parte de los **experimentalistas** a la escala de parcela y de los **modelizadores** a la escala de cuenca. Uno de los focos de atención actual de la investigación en este campo se centra en el concepto de **conectividad**, cuestión transversal abordada por distintas disciplinas.

Existen dos aproximaciones fundamentales a este concepto, la **conectividad estructural** vs. la **funcional** refiriéndose a las cuestiones de formas y procesos respectivamente, que a pesar de reconocer su interrelación, son perspectivas todavía tratadas de forma contrapuesta. En este contexto, se evidencia la necesidad de un adecuado **marco teórico/conceptual y metodológico** especialmente indicado para abordar las cuestiones de **salto de escala** (*scaling-up*) y **diagnóstico** de los sistemas desde una perspectiva de degradación.

La **hipótesis de partida** (Tabla 1.1) de esta tesis propone que los **componentes superficiales del suelo (CSS)** son una fuente relevante de heterogeneidad espacial desde la escala de parche (*patch*), cumpliendo un papel clave en los procesos geomórficos de generación de escorrentía y movilización de sedimento a escala de ladera, influyendo en su respuesta hidrogeomorfológica. El análisis de patrones de distribución espacial de CSS es pues un elemento fundamental en la detección de umbrales de conectividad hidrológica a lo largo de la ladera, los cuales determinan la respuesta general del sistema. Se conceptualiza el término Componente Superficial del Suelo (CSS) como la *más elemental expresión visible, identificable y discreta de tales propiedades de la superficie del suelo y por tanto como unidades homogéneas de respuesta hidrológica*.

El **objetivo general** de la tesis (Tabla 1.1) es definir la influencia de los componentes superficiales del suelo (CSS) en la respuesta hidrogeomorfológica de las laderas mediterráneas a diferentes escalas espaciales y temporales. Este objetivo se desglosa en cuatro **objetivos específicos**: (i) analizar los patrones de distribución de CSS; (ii) caracterizar la respuesta a la escorrentía de los diferentes CSS a escala de micro-parcela; (iii) estudiar la influencia de los patrones de CSS a escala intermedia (*stand*)

y su dinámica temporal en la respuesta hidro-geomorfológica e (iv) investigar el funcionamiento hidrológico de la ladera considerando especialmente el efecto de los patrones de CSS.

El **marco conceptual** de esta tesis (Figura 1.15) se apoya en la **Teoría General de Sistemas**, teniendo en cuenta las características de **estructura, auto-organización y transferencia** de materia y energía como claves que definen a un sistema y se adopta una estructura jerárquica anidada basada en la **Teoría Jerárquica**. Además el análisis se realiza desde una **aproximación proceso-patrón**.

El trabajo se desarrolló en tres laderas seleccionadas como muestras de dos zonas de estudio en la provincia de Alicante (Capítulo 2, Figura 2.2), que debido al gradiente altitudinal existente, representan el contraste climático entre el mediterráneo semiárido (Benidorm) y el subhúmedo (Cocoll), mientras que se mantiene semejante la litología (calizas). Además se incorpora el factor exposición en el área de Benidorm.

Desde el punto de vista **metodológico** (Capítulo 3), se utilizan técnicas de experimentación en campo (simulaciones de lluvia) que proporcionan detalle de los procesos en parcelas pequeñas y en tormentas simuladas y controladas. Todo ello se combina con el estudio a medio-largo plazo de la respuesta hidrológica en condiciones de lluvia natural en parcelas abiertas con mínimas alteraciones, que permiten estudiar la dinámica temporal de la respuesta hidro-geomorfológica. Se implementa además un sistema de adquisición de fotogramas en campo con el que se obtiene un foto-mosaico que permite la cartografía detallada de CSS en transectos de ladera para el análisis de su distribución espacial en el sentido del flujo. Finalmente se elabora un modelo para simular la infiltración y escorrentía superficial a escala de ladera; modelo de base empírica alimentado con la respuesta unitaria de cada CSS y distribuido según la cartografía de CSS (Figuras 3.0.1 y 3.1.1).

Del **análisis de las formas** (Capítulo 4), se obtiene la sistematización de la distribución de CSS en términos de procesos eco-hidro-geomorfológicos basado en dos aspectos fundamentales: (i) inspección de la **heterogeneidad y detección de patrones** cíclicos mediante técnicas de Análisis de Series Temporales (TSA) e (ii) interpretación de las formas asociadas al **blindaje superficial**, el cual ejerce un **control abiótico** en la dinámica de los patrones de CSS. La combinación de estos resultados ha permitido la **sectorización** de cada transecto de ladera según diferentes configuraciones espaciales que se traduce en tramos de ladera con una dinámica eco-hidro-geomorfológica concreta (Figuras 4.16; 4.18 y 4.20), y por tanto de redistribución de flujo de escorrentía y sedimentos (relaciones **fuentesumidero**).

En el apartado del **análisis de la respuesta** (Capítulo 5), con los **experimentos de situación de lluvia** (RFS) además de profundizar en la comprensión del funcionamiento del proceso de infiltración-escorrentía a esta escala de análisis, se constata el efecto de los CSS como **moduladores de la respuesta** frente a otras variables locales.. Así, el llamado **efecto CSS** se logra descomponer analizando la interacción de la respuesta (*proceso*) con las diferentes **propiedades superficiales clave** (patrón). La respuesta se parametriza en base al ajuste de la ecuación de Horton (parámetros P_0 , α y F_c), posibilitando un **sistema de análisis** semi-cuantitativo basado en la búsqueda de relaciones entre ambos aspectos. En una última **fase de asignación** se obtiene la respuesta unitaria de cada CSS en cada área de estudio en lo que denominamos **hidrograma tipo** (Figura 5.35).

Del análisis de la respuesta en la **escala intermedia de parcela** (*stand*) (Capítulo 6) en condiciones de lluvia natural también se **corroboró el efecto modulador de los CSS**. Se observa cambios temporales en las relaciones precipitación vs. escorrentía y movilización de sedimento (Figura 6.5), en función de las modificaciones en la cobertura de CSS. Esta dinámica de cambio de las formas y los procesos se interpreta como un fenómeno de evolución natural que promueve *estados transicionales* de los patrones de CSS que precisa de un reajuste a nivel de ladera en términos de balance hídrico y sedimentario. Además, y gracias a la serie de datos disponible, se obtienen diferentes **umbrales de respuesta**, los cuales rigen el comportamiento en estos sistemas de funcionamiento no-lineal.

La posibilidad de incorporar estos umbrales como **calibración del modelo de simulación** (Capítulo 7, Figura 7.1) a escala de ladera fue fundamental para el salto de escala, desde la respuesta a nivel de parche (*hidrogramas tipo*) hasta la de ladera, pues añadió las *reglas de funcionamiento* de cada ladera, en este caso, referidas a la **capacidad de almacenamiento efectivo de agua** en el suelo. Así, en el último apartado de modelización a escala de ladera, el propósito fue desarrollar una rutina que reprodujese de manera simple la distribución del flujo superficial, minimizando la exigencia de entradas que alimentan el modelo.

El modelo, aplicado con una lluvia de igual intensidad (55 mm h^{-1}) que la de los experimentos de simulación de lluvia, permitió delimitar una serie de valores umbral de precipitación acumulada entre los que se produce el inicio del *llenado efectivo* y la conectividad entre sumideros de las laderas. Estos umbrales son mucho más amplios en el subhúmedo de Cocoll (de 45 a 138 mm de lluvia) que en el semiárido de Benidorm (de 37 a 74 mm), alcanzando este último con mucha mayor facilidad la conectividad hidrológica de la ladera. El análisis de la serie de datos de las parcelas de campo, en las que la escorrentía es consecuencia de precipitaciones naturales con distribución variable de las intensidades de lluvia, se encuentra dentro de los rangos de estos valores, siempre que se trate de eventos con intensidades máximas elevadas y con continuidad horaria.

Con el cierto grado de certidumbre obtenida del contraste de resultados del modelo con datos de la medición en campo en condiciones reales se establecieron las bases de una **hipótesis sobre el funcionamiento general del Modelo Mixto de escorrentía** (Calvo-Cases *et al.*, 2003) sintetizada en cuatro fases de respuesta, en función de umbrales de cambio en los patrones de conectividad de la escorrentía, espacial y en magnitud (Figura 7.9). De forma genérica estas fases describen la manera en la que se transita desde una situación inicial de escorrentía *hortoniana pura* hasta un escenario extremo en el que se ha superado la *capacidad de almacenamiento efectivo* del suelo a lo largo de todo el transecto, y por tanto con una respuesta asimilable al mecanismo *por exceso de saturación*.

Se observó una buena **correspondencia entre los patrones de respuesta y los de configuración espacial** (Figura 7.10; 7.11 y 7.12), estos últimos representados en los diferentes tramos obtenidos en la *sectorización* del análisis de las formas. La confluencia de ambos resultados sirve de comprobación para las metodologías respectivas de obtención de los patrones de escorrentía y de configuración de CSS.

Se encontraron **además dos modalidades de comportamiento** contrastados que en algunos momentos del evento coexisten, y que evolucionan a lo largo del mismo. Se identifican sectores en

los que la **magnitud de la escorrentía se amplifica** a medida que llueve, y que se corresponden con áreas donde hay CSS con un inicio temprano y altas tasas de escorrentía (roca y superficies sin blindaje superficial). Y otros sectores que sin embargo ejercen una **función de amortiguación** de estas ondas de avance de la escorrentía. Este contraste en el comportamiento de los diferentes sectores está marcado tanto por los diferentes patrones de CSS, como por la relación de longitudes entre áreas generadoras (no-vegetadas) y receptoras (vegetación) netas de escorrentía, es decir las **relaciones fuente-sumidero**. La cuestión más relevante que se deriva de este resultado es que la **secuencia** de tipos de respuesta hidrológica (el orden de aparición en la ladera) condicionada por el patrón de CSS, entre otros factores, es la que determina la respuesta hidrológica general de la ladera en su base, y por tanto afecta a la exportación neta de agua y sedimentos fuera del **sistema ladera**.

En términos de **valoración general del funcionamiento** de los sistemas estudiados, siguiendo el modelo de referencia de Lavee *et al.*, (1998) que relaciona el gradiente climático con los patrones de distribución de las áreas fuente-sumidero, la ladera de Cocoll (CC) presenta un **patrón de degradación**, mientras que los de las laderas de Benidorm (BE) atienden a una **configuración funcional** propia de la adaptación del medio semi-árido a la escasez de hídrica. Las diferencias encontradas entre ambas laderas de BE puso de manifiesto la sensibilidad de estos medios semi-áridos a leves cambios micro-ambientales, en este caso por efecto de la exposición contrastada (Norte-Sur).

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

El **funcionamiento de los sistemas naturales** y semi-naturales es la cuestión fundamental que atañe a múltiples disciplinas, destacando la ecología, hidrología y geomorfología, las cuales convergen en contextos de análisis como el medio mediterráneo semi-árido, donde la escasez de agua y la heterogeneidad espacial son características definitorias, convirtiéndose así en un escenario de extrema complejidad.

Si bien se han producido grandes avances en el conocimiento de ciertos procesos que gobiernan estos ambientes, es también destacable las todavía importantes lagunas existentes, especialmente en aquellas escalas más generales, donde el grado de heterogeneidad espacial, y por tanto de complejidad, adquiere su máxima expresión. Una cuestión todavía pendiente es el acercamiento a las **claves para la integración de subprocesos** desde escalas de detalle hacia esas escalas generales (escalado o *scaling-up*).

Por otro lado, la comprensión de su funcionamiento es necesaria para la **diagnos****is del estado de degradación**/recuperación de estos sistemas de elevada vulnerabilidad, en parte debido al impacto antrópico que han soportado históricamente junto a la escasez de recursos (agua y suelo) característicos de este entorno.

Este es el panorama donde se enmarca la presente tesis, considerando necesario un ejercicio previo sobre el estado de la cuestión del funcionamiento de los geo-ecosistemas y un apartado específico dedicado a los nuevos retos que deben afrontarse en el contexto actual en el que se están sentando las bases de un cambio de paradigma desde una perspectiva multidisciplinar. Tratamos también de articular el marco teórico y conceptual de trabajo, dado que el reto fundamental de abordar el escalado de subprocesos es en su esencia metodológico. Finalmente, se exponen los objetivos y estructura de esta tesis.

1.1 ESTADO DE LA CUESTIÓN

En el contexto climático mediterráneo donde nos encontramos el proceso de generación de escorrentía desde una perspectiva geomorfológica tiene un doble papel (i) como agente geomórfico principal en la movilización de sedimentos y (ii) como primer componente de redistribución de agua

en el suelo durante un evento de precipitación, lo cual condiciona el desarrollo de la vegetación, siendo ésta a su vez otro componente fundamental en la regulación de los procesos geomórficos.

Es pues inevitable la convergencia de la geomorfología con otras disciplinas afines, especialmente la hidrología y la ecología, con las que comparte muchas veces objetivos y metodologías concretas, que desde este punto de vista esta tesis se plantea con un "propósito geomórfico desde la comprensión hidrológica y con consideraciones ecológicas.

Revisamos así los procesos de generación de escorrentía en climas semi-áridos, tanto desde el funcionamiento hidrológico del sistema, como desde la de función o servicio que ofrece la hidrología al resto de componentes del sistema.

1.1.1 Mecanismos básicos de generación de escorrentía *in situ* (point-scale)

Partiendo de la premisa de que la generación de escorrentía superficial en un punto concreto del espacio sucede cuando cierta fracción de precipitación no es infiltrada en el suelo, encontramos que son posibles dos únicos mecanismos básicos de generación de escorrentía *in situ*: (i) aquel en el que la intensidad de precipitación supera la capacidad de infiltración del suelo, conocido como **escorrentía hortoniana** o por exceso de infiltración (Horton, 1933); (ii) y aquel en el que se ha sobrepasado la capacidad de almacenamiento de agua en el suelo (estado de saturación) y por tanto se anula la posibilidad de infiltración, conocido como mecanismo por **exceso de saturación**.

Esta aparente simplicidad en el fenómeno de generación de escorrentía adquiere un elevado grado de complejidad al considerar que son regulados por las características de la precipitación (frecuencia, magnitud e intensidad), las propias capacidades de infiltración y las condiciones antecedentes de humedad del suelo (Figura 1.1). Y precisamente estos tres factores clave en la regulación genérica del funcionamiento hidrológico muestran una enorme variabilidad en el espacio y en el tiempo en múltiples escalas.

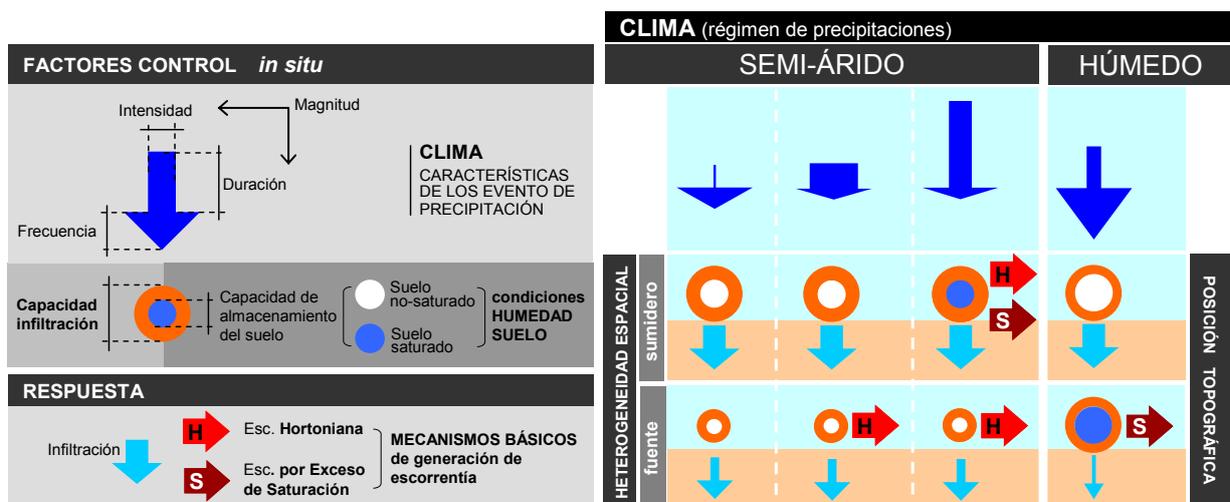


Figura 1.1 Factores de control en la ocurrencia y magnitud de los mecanismos básicos de generación de escorrentía.

El **contexto climático** es el primer control en la predominancia de uno de estos mecanismos, pues el régimen pluvio-térmico determina de manera directa las características de la precipitación y la humedad del suelo. En **climas húmedos** templados, en las que la mayor frecuencia de situaciones de saturación de los suelos, intensidades de lluvia menos extremas y una mayor homogeneidad y elevada capacidad de infiltración de los suelos sitúa al mecanismo por exceso por saturación como el predominante, llegando a considerarse altamente residual la escorrentía hortoniana (Beven, 2002).

Las condiciones climáticas en el entorno Mediterráneo, que varían desde el árido y semiárido al subhúmedo, se caracterizan por un importante déficit hídrico estival y una elevada variabilidad en la intensidad y estacionalidad de los eventos de precipitación (López-Bermúdez y Albadalejo, 1990). Estas características no favorecen situaciones de saturación de los suelos, sino que las fuertes intensidades que pueden llegar a alcanzarse en un evento, sobrepasan su capacidad de infiltración, resultando unas condiciones que favorecen la predominancia del mecanismo básico de generación de escorrentía hortoniana (Yair y Lavee, 1985; Lavee *et al.*, 1998; Beven, 2002; Calvo *et al.* 2003). Si bien en ciertas circunstancias de elevada duración y magnitud de la precipitación, el mecanismo hortoniano puede aparecer combinado con la escorrentía por exceso de saturación (Martínez-Mena *et al.*, 1998; Lange *et al.*, 2003; Calvo *et al.* 2003).

Estrechamente relacionado con el mecanismo de generación de escorrentía hortoniano predominante en clima Mediterráneo, está la **capacidad de infiltración de los suelos**, la cual es un proceso fundamental que controla la respuesta final de la escorrentía.

1.1.2 Factores control de la infiltración

En el proceso de infiltración intervienen multitud de factores referentes a las propiedades del suelo, que para sistematizar la exposición, aquí los podemos descomponer en dos dominios: (i) la capacidad de infiltración está condicionada por las propias características generales de los suelos del área de estudio, a lo que denominaremos **efecto local**. (ii) Sin embargo el control más directo e inmediato en la respuesta está la capa más superficial del suelo, que actúa como primer filtro ante la precipitación incidente, al que podemos denominar **efecto de la superficie o superficial**.

Efecto local

Variables climáticas, litológicas, topográficas, de desarrollo y profundidad de los suelos, e incluso el historial de uso determinan las características específicas del suelo y éstas a su vez la capacidad de infiltración. Los principales procesos implicados a esta escala son, por un lado, los de componente vertical, marcado por la conductividad hidráulica entre diferentes profundidades a lo largo del perfil de suelo y la velocidad de percolación hacia el sustrato rocoso. Y por otro, los de componente horizontal o lateral, englobados en el flujo de escorrentía subsuperficial ladera abajo.

Es ya muy amplia la experimentación sobre infiltración en una gran diversidad de ambientes, recogiendo una gran variedad de dominios litológicos, climáticos y de presión de uso del suelo

(Cerdá, 1993). Y a pesar de la constatación del marcado efecto local de la respuesta hidrológica, existe el inconveniente de una falta de sistematización de resultados en conjunto.

Cabe destacar la importante aportación de los trabajos realizados en el marco de análisis de los gradientes climáticos, en los que manteniendo cierta homogeneidad en la variable litológica se analiza el efecto del clima en las propiedades del suelo y su respuesta hidrológica (infiltración y escorrentía). El contexto Mediterráneo ha sido en este sentido un marco idóneo de experimentación, por la combinación de una rápida variación climática en una escasa distancia unido a cierta homogeneidad litológica dentro del dominio calizo. Bajo este marco metodológico, en la década de los '90, debido a la creciente preocupación por los procesos de degradación del suelo, se desarrolló una interesante producción experimental y de síntesis: Lavee *et al.*, (1998) en Israel, (Boix-Fayos *et al.*, 1998; Boix-Fayos *et al.*, 2001; Calvo-Cases *et al.*, 2003) en España, Grecia y en el marco del proyecto ERMES en el Mediterráneo. En términos generales los resultados muestran una marcada influencia de la respuesta en función de la situación en el gradiente climático, con un progresivo descenso de las capacidades de infiltración a medida que desciende la pluviometría (Lavee *et al.*, 1998) y Boix-Fayos, 2001). También se ha puesto de manifiesto el importante efecto de los procesos de degradación asociados a un uso intensivo y/o extensivo del suelo, con especial hincapié en el pastoreo, en la respuesta hidrológica (Boix-Fayos *et al.*, 1995).

Efecto de la superficie o superficial

Éste se superpone al carácter general local de los suelos, modulando a una escala de microambiente de más detalle la respuesta de la infiltración. A este respecto, existe una elevada variabilidad espacial de las propiedades superficiales del suelo de las que depende en gran medida las capacidades de infiltración (estructura, contenido en materia orgánica, humedad del suelo, etc.), controladas principalmente por la presencia de diferentes elementos en la superficie (vegetación, fragmentos rocosos, tipos de costra, presencia de suelo desnudo), los cuales presentan una distribución *parcheada* en el espacio (Brakensiek y Rawls, 1994; Lavee *et al.*, 1998; Maestre y Cortina, 2002; Roth, 2004).

En las pasadas décadas la investigación tuvo un gran interés en los procesos de infiltración y escorrentía a **escala de parcela** (i.e. unidad espacial de cierta homogeneidad superficial), en la que los datos experimentales a partir de simulaciones de lluvia y medidas de capacidades de infiltración en condiciones de campo y laboratorio, mostraron una elevada variabilidad en la respuesta en función de los elementos presentes en la superficie del suelo.

En parcelas con cobertura vegetal, la respuesta general es la importante reducción de las tasas de escorrentía a partir de cierto umbral de cobertura (del 30% en Francis y Thornes, 1990, del 20% en Alexander y Calvo, 1990). Si bien en parcelas puras de vegetación son unánimes los resultados con unas tasas de escorrentía mínima o nula. La mayor parte de las diferencias en las tasas de escorrentía en la vegetación está no sólo relacionada con el grado de cobertura total, sino que también es función de la fisionomía de la planta y estructura de la vegetación, habiéndose descrito a este

respecto diferencias en los fenómenos de interceptación, flujo cortical y trascolación (Wainwright *et al.* 2000; Belmonte-Serrato y Romero-Díaz, 1998 y 2013; Casermeiro *et al.* 2004).

En el entorno Mediterráneo es característica la presencia generalizada de una elevada cobertura de fragmentos rocosos en el espacio de suelo entre la vegetación dispersa (Poesen, 1990). Los efectos de la cobertura de fragmentos rocosos han sido analizados en términos de porcentaje de cobertura, del tamaño y de la posición relativa respecto de la superficie del suelo (sobre la superficie o parcialmente embebidos) (Poesen *et al.*, 1990; Lavee y Poesen, 1991; Poesen y Ingelmo-Sanchez, 1992; Moustakas *et al.*, 1995). Los resultados muestran un significativo efecto en la respuesta de la escorrentía y un papel dinámico en los procesos de erosión (Kirkby *et al.*, 1998).

Otro importante factor que se ha puesto de manifiesto como responsable de la variabilidad espacial en la capacidad de infiltración del suelo y la generación de escorrentía es el papel del sellado superficial en la dinámica de la respuesta en suelos desnudos, y especial en aquellos con cierta propensión a la formación de costra superficial (Morin y Benyamini, 1977; Farres, 1978; Roth y Helming, 1992; Greene y Hairsine, 2004). Este fenómeno está asociado a la completa desprotección de la fracción fina del suelo ante los impactos de las gotas de lluvia, alterando sus condiciones de agregación: (i) durante el evento de precipitación con el consiguiente sellado de los poros y progresiva reducción de la infiltración, y (ii) tras el evento, con la aparición de costra mineral superficial. Así mismo, destacar que la acción biológica (lombrices, termitas) se manifiesta como un importante agente que favorece la agregación en superficie (Boix-Fayos, 2000; Cammeraat *et al.* 2002; Cammeraat y Risch, 2008), aunque en algunos casos forma agregados grandes que no mejoran la estructura del suelo (Boix-Fayos *et al.*, 2001).

Esta escala de análisis (escala de parcela) ha permitido la comprensión cualitativa de la respuesta hídrica en diferentes situaciones de cobertura superficial, y por tanto diferentes grados de protección contra el impacto de las gotas de lluvia. Y con esto, se ha conseguido un mayor conocimiento en el funcionamiento de los mecanismos implicados en cada sub-categoría de cobertura, esencialmente en cuanto a aspectos de hidráulica (vegetación y fragmentos rocosos fundamentalmente) y dinamicidad (costra mineral) durante el evento de precipitación.

1.1.3 Concepto de Componente Superficial del Suelo (CSS): unidad de respuesta hidrológica

Con respecto al *efecto superficial*, Lavee *et al.* (1998) señalan como la variabilidad en la respuesta es reflejo de la heterogeneidad espacial en las características de la superficie, y remarca la idea de que la existencia de parches de propiedades homogéneas está controlada fundamentalmente por la distribución espacial de la vegetación, la pedregosidad, costra, etc.

En este sentido surge el concepto de Componente Superficial del Suelo (CSS) (Lavee *et al.*, 2004) como la más elemental expresión visible, identificable y discreta de tales propiedades superficiales del suelo y por tanto como unidades homogéneas de respuesta hidrológica (Arнау *et al.*, 2008). De una manera análoga a la definición de “unidades de respuesta” (*Response Units*) descritas en escalas más generales de análisis (Casenave y Valentin, 1992; Cantón *et al.*, 2002; Cammeraat, 2004; Kirkby *et al.* 2002) como una manera sintética de abordar el salto de escala (*upscaling*) (Imeson *et al.*, 1994, 1995).

Así, este concepto sobrepasa la mera consideración de elementos presentes en la superficie del suelo con entidad propia, como son los individuos de plantas y los fragmentos rocosos, y pretende un mayor grado de abstracción, aglutinando fracciones superficiales del suelo con una respuesta integrada a la escorrentía.

1.1.4 Modelo conceptual de generación de escorrentía: discontinuidad por infiltración

Como consecuencia de la elevada variabilidad en el espacio de la respuesta hidrológica, el modelo conceptual de escorrentía descrito para el medio semiárido es heterogéneo y por tanto de una marcada discontinuidad del flujo superficial (Lavee *et al.*, 1998; Calvo *et al.*, 2003; Boix-Fayos *et al.* 2006). Lavee *et al.* (1998) ilustra (Figura 1.2-Izq.) para el medio semi-árido un modelo dominado por el mecanismo de generación de escorrentía hortoniano. Sin embargo, Calvo *et al.* (2003) proponen la posibilidad de desencadenarse un modelo mixto de simultaneidad temporal de escorrentía hortoniana y por exceso de saturación (Figura 1.2-Dcha.), ante la posibilidad de sobrepasarse determinados umbrales de almacenamiento de agua en el suelo en áreas espacialmente restringidas.

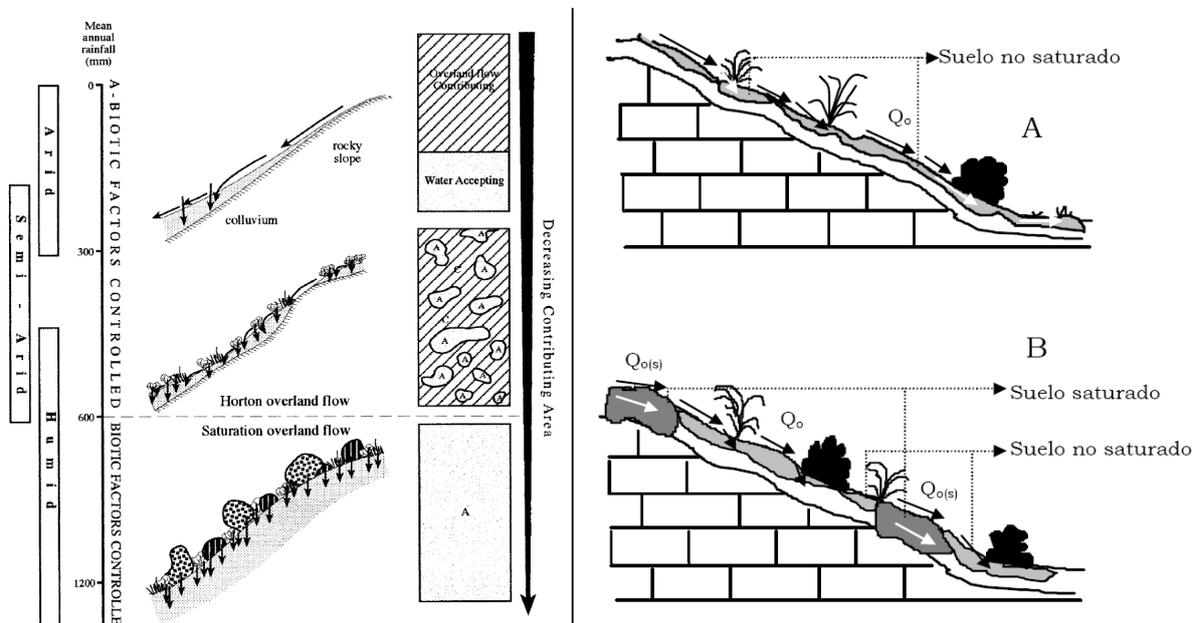


Figura 1.2 Modelos conceptuales de funcionamiento de la escorrentía: (Izq.) Lavee *et al.* (1998) y (Dcha.) Boix-Fayos (2000).

Desde un punto de vista funcional y referido a la distribución de la escorrentía, se ha descrito y comprobado como un patrón en mosaico de áreas generadoras y receptoras (*fuentes-sumidero*) del flujo superficial (Noy-Meir, 1973; Yair y Lavee, 1985; Lavee *et al.*, 1998; Ludwig *et al.*, 2005). Es preciso destacar el eminente carácter dinámico de este mosaico de áreas generadoras/receptoras durante el evento de precipitación, especialmente con la adopción de un modelo mixto de funcionamiento.

Este modelo contrasta fuertemente con el aceptado de funcionamiento general en zonas húmedas, basado en el modelo de Área Fuente Variable (*Variable Source Area*, Hewlett, 1961 y Hewlett y Hibbert, 1967), estrechamente relacionado con flujo por exceso de saturación, y controlado en este caso por convergencia de flujos laterales o por ascenso progresivo del nivel freático, en el que la

variable topográfica es un factor fundamental, modelizado con el índice topográfico en el modelo TOPMODEL (Beven y Kirkby, 1979).

Evidencias experimentales sobre esta discontinuidad en medio semi-árido se han encontrado mediante simulaciones de lluvia en parcelas multi-escala (Bergkamp, 1998; Cammeraat y Imeson, 1999; Wainwright *et al.* 2000; Wilcox *et al.*, 2003; Cantón *et al.*, 2011; Lázaro *et al.*, 2015), en los que las tasas y longitudes de flujo decrecen con la longitud de la parcela, debidos a la progresiva infiltración en áreas receptoras (normalmente de cubierta vegetal) ladera abajo.

1.1.5 Funcionamiento hidrológico general del sistema

Este modelo conceptual de generación de escorrentía superficial es una manifestación parcial del funcionamiento hidrológico general del sistema (geo-ecosistema) que tiene su origen en múltiples interrelaciones y subprocesos que operan a diversas escalas espacio-temporales. La organización del sistema se ha descrito como una estructura jerárquica anidada de diferentes niveles de escala conectados en unas relaciones de interdependencia (O'Neill, 1986; Phillips, 2003; Bergkamp, 1998 y Cammeraat, 2002, 2004), en las que los niveles superiores constriñen el comportamiento de los inferiores, y éstos influyen la respuesta de los superiores. En otros términos, en un contexto de auto-organización, las propiedades de los niveles superiores emergen a partir del funcionamiento de los niveles inferiores, siempre desde el marco de posibilidades delimitadas por los niveles superiores.

El funcionamiento general de un sistema en su conjunto, y de cada nivel en particular, se rige por el grado de conectividad de masa, energía e información transmitida entre niveles o elementos. En el caso del sistema eco-geo-hidrológico, la transmisión de flujos de agua, sedimentos y nutrientes es un aspecto clave para la comprensión de su funcionamiento, tanto parcial en cada nivel de escala como en su conjunto. Con este propósito se presentan los diferentes niveles de escala establecidos en el funcionamiento eco-geo-hidrológico.

La escala más elemental de análisis, **la escala de (intra-) parche** (*patch-scale*), tiene como objeto las dinámicas y procesos que tienen lugar a nivel de unidades homogéneas superficiales (parches), y siempre desde una aproximación independiente de su entorno (parches vecinos). El criterio pormenorizado que define estas unidades homogéneas superficiales, parches, depende del propósito del análisis, que si bien no existe una definición exhaustiva del término, no desciende del tamaño decimétrico y siempre inferior a la escala de ladera (Lavee *et al.*, 1995= 1m²). Aunque por lo general, desde la hidrología superficial, suele referirse a la diferenciación entre áreas vegetadas y desnudas. Esta dicotomía está fundamentada desde un criterio de funcionamiento hidrológico, en especial de comportamiento frente a la escorrentía.

Puigdefábregas (2005) sintetiza, con el concepto de *Vegetation Driving Spatial Heterogeneity* (VDSH), el proceso de diferenciación espacial en parches con propiedades contrastadas mediante mecanismos de retroalimentación promovidos por la vegetación. Estos mecanismos a los que hace referencia son en última instancia el resultado en los balances de agua y radiación; de carbono orgánico; de nutrientes y de sedimentos. El efecto de estas interacciones suelo-vegetación propicia una distribución espacial en mosaico de áreas con óptimas condiciones para la infiltración (áreas

vegetadas) y de áreas en las que se registran tasas más elevadas de escorrentía (áreas desnudas entre la vegetación). Esta circunstancia transfiere a la escala superior un escenario de contraste y heterogeneidad espacial con implicaciones en los procesos de ese nivel superior.

La siguiente escala de análisis, **parcela** (*stand-scale*), ya considera las interacciones existentes entre elementos del mosaico (inter-parche), y por lo tanto, la manera en que se organizan en el espacio comienza a adquirir relevancia, en cuanto ésta marcará el carácter general en la redistribución del flujo superficial (Bergkamp, 1998; Puigdefábregas *et al.*, 1999; Cammeraat y Imeson, 1999). Puesto que la escorrentía es el principal flujo de materia que interconecta los diferentes parches, el proceso adquiere un marcado carácter anisotrópico y unidireccional ladera abajo por efecto de la gravedad. Esto, combinado con un mosaico de áreas de infiltración limitada (áreas generadoras) e infiltración preferente (áreas receptoras), da como resultado un marco básico de organización en el que las áreas vegetadas adquieren un suplemento de agua, sedimentos y nutrientes de un área determinada de drenaje aguas arriba compuesta por suelo desnudo (no colonizado por plantas). Este principio básico de interacción suelo desnudo / vegetación puede adquirir múltiples configuraciones en función de variables climáticas y balance de agua, capacidades de almacenamiento de agua en el suelo, etc.

En esta escala también se han identificado estructuras más complejas de auto-organización que retroalimentan y refuerzan estas interacciones. Se trata de la capacidad del sistema de desarrollar una meso-topografía favorable para la captación del flujo de agua y sedimentos en forma de pedestales, observados en macollas de *Stipa* a partir de cierto gradiente de pendiente (Bergkamp *et al.*, 1996; Cammeraat y Imeson, 1999; Bochet *et al.*, 2000), incluso demostrando su formación mediante modelos de simulación (Gallart *et al.* 1993) en el Pirineo; Puigdefábregas y Sánchez 1996 en Almería).

A modo de síntesis, en esta escala de análisis es donde se afianzan los mecanismos que garantizan la supervivencia de la vegetación en sistemas limitados en agua, desarrollando estructuras funcionales para y por la redistribución del flujo superficial. El resultado es unos parches de vegetación que funcionan como trampas de recursos (agua, sedimento y nutrientes) por sus propiedades “hidráulicas” favorables: presencia de macro-poros que actúan como flujos preferentes para la infiltración; ausencia de sellado superficial por la protección del suelo ante el impacto de la gotas de lluvia y la ralentización del flujo por la meso-topografía en ciertas circunstancias de desarrollo de pedestales. Ludwig y Tongway (2000), denominó de forma muy gráfica a este proceso como el “efecto Robin Hood inverso” o de *concentración de la riqueza*.

Esta transmisión de escorrentía desde las áreas desnudas a las vegetadas ha sido extensamente identificada en los ambientes de patrones de vegetación en bandas (Dunkerley y Brown, 1995; Galle *et al.*, 1999; Ludwig *et al.*, 1999).

La **escala de ladera** constituye una unidad geomórfica completa en un *continuum* desde la divisoria hasta la parte baja de la ladera. De la integración espacial de cada una de las relaciones vegetación-suelo desnudo que tienen lugar a escala de parcela (*stand-scale*) a lo largo del transecto, emerge un nuevo *estado de ladera* característico. Este nuevo orden en un nivel jerárquico superior

(ladera), además de emerger de la escala inmediatamente inferior (parcela o *stand*), está asimismo constreñido por las propias propiedades morfológicas de la ladera producto de una secuenciación de procesos a una escala temporal superior. A esta escala el interés se centra en la organización de los procesos geomórficos que interconectan los diferentes sectores de la ladera. Ejemplo de ello son los procesos relativos a los patrones de movilización de sedimento; el régimen de dependencia de la vegetación al aporte hídrico adicional por parte de áreas desnudas aguas arriba; umbrales de conectividad hidrológica entre diferentes sectores de la ladera, y entre la ladera y el canal principal; etc.

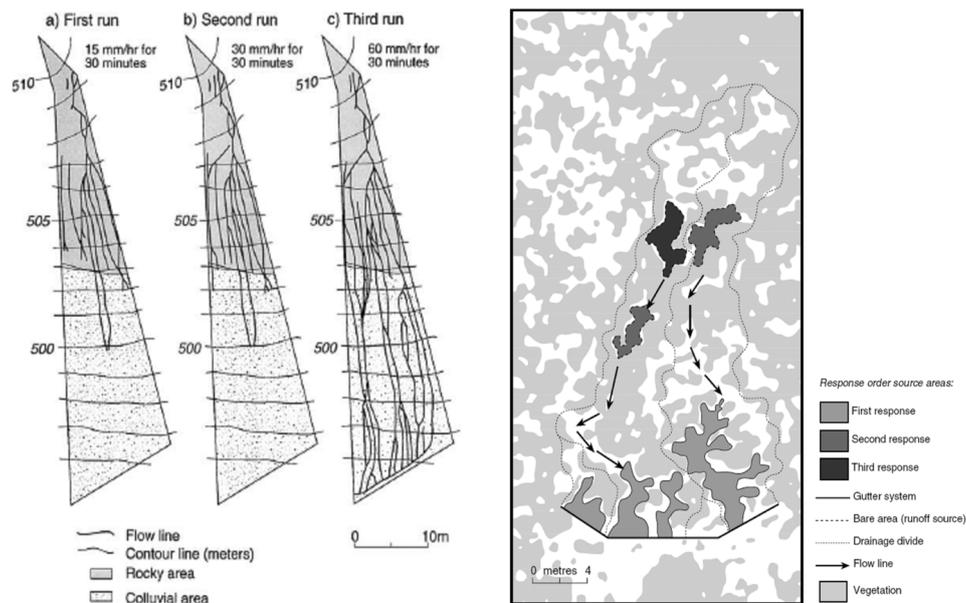


Figura 1.3 Dos ejemplos de trabajos donde se constata la desconexión del flujo superficial a escala de ladera con datos experimentales. (Izq.) en Yair (1983); (Dcha.) en Cammeraat (2004).

En la escala de ladera, la interrupción del flujo se traduce en una desconexión hidrológica entre las diferentes partes de la ladera, y con ello la dificultad de alcanzar el cauce principal (Figura 1.3), que se producirá únicamente tras pasados ciertos umbrales de precipitación (Yair, 1983; Puigdefábregas, 1998; Cammeraat, 2004, Yair y Raz-Yassif, 2004) y según el grado de acoplamiento (Harvey, 2001; Bracken y Croke, 2007). Algunos autores han puesto de manifiesto que el tamaño de las áreas de contribución, la longitud de éstas hasta alcanzar un área receptora y el tamaño de grano del patrón de vegetación (fino o grueso), son cualidades importantes en el balance final de salida de flujo del sistema (Lavee *et al.* 1998; Puigdefábregas, 2005; Boer y Puigdefábregas, 2005; Imeson y Prinsen, 2004). A pesar de la identificación de posibles variables que definan las interrelaciones y umbrales de conexión de la escorrentía superficial, es muy limitada la producción de trabajos que profundicen en los mecanismos de funcionamiento hidrológico en esta escala desde una perspectiva espacio-temporal, y además se relacione con los patrones espaciales de distribución de las áreas receptoras y generadoras. Bautista *et al.* (2007) consiguen una buena correlación entre el tamaño de grano de los patrones de vegetación y las tasas de escorrentía medidas en parcelas de escorrentía en condiciones de lluvia natural, de manera que una distribución de la vegetación configurando un grano fino (pequeños parches de vegetación) parece más eficiente en la captura de escorrentía, y por tanto presentando unas tasas de escorrentía significativamente inferiores a las resultantes de una

configuración de grano grueso. Esto concuerda con la hipótesis lanzada por Boer y Puigdefábregas (2005) a partir de un ejercicio de simulación con modelos, sobre la relación entre configuraciones espaciales y flujos superficiales. En última instancia, estas relaciones de escorrentía medida en parcelas de campo con los patrones de distribución de la vegetación están muy determinadas por la propia posición del colector de las parcelas en relación a las manchas de vegetación (Calvo *et al.*, 2005), por lo que las interpretaciones proceso-patrón no deben perder de vista la jerarquía de niveles de escala, tanto desde el punto de vista de los procesos como de los patrones.

El interés en la investigación de los procesos hidrológicos a escala de ladera está diversificando hacia la incorporación de mecanismos desencadenantes del flujo subsuperficial, especialmente de flujo lateral. Las nuevas aportaciones en este campo intentan determinar la ocurrencia de escorrentía subsuperficial generalizada a escala de ladera una vez se han alcanzado ciertos umbrales de conectividad entre áreas saturadas del suelo (Lehmann *et al.*, 2007; Hopp y McDonnell, 2009), si bien la investigación en este respecto se está desarrollando fundamentalmente en el dominio de clima húmedo, en el que el flujo sub-superficial es dominante.

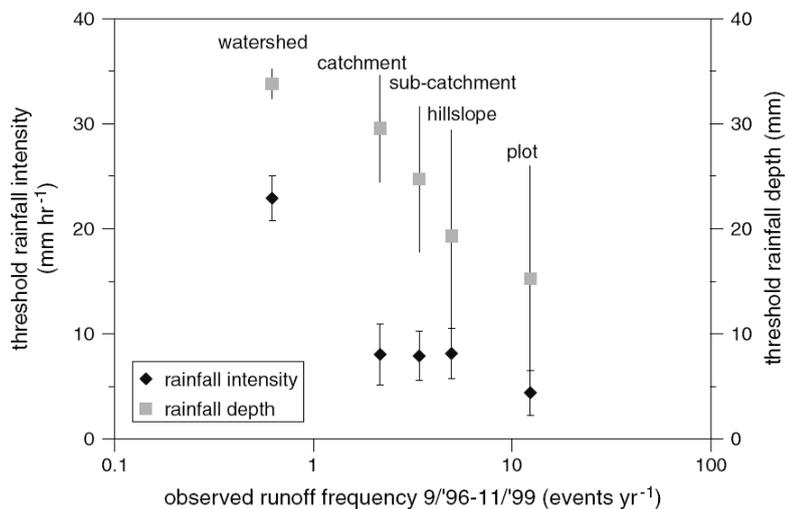


Figura 1.4 Umbrales de respuesta de la escorrentía en función de la intensidad y magnitud de la precipitación según el nivel de escala en Cammeraat, 2002.

El último de los niveles es la **escala de cuenca**, que consiste en la agregación de múltiples unidades de ladera en un variable rango de diversidades posibles (orientaciones, morfologías, coberturas, etc), junto a la unidad diferenciada del fondo de valle. El cauce presenta una dinámica propia con cierta independencia de las laderas, relacionada con las pérdidas por transmisión en momentos de crecida. Las cuencas se organizan en diferentes órdenes anidadas en función de la ramificación de sus redes de drenaje, significando un progresivo aumento de la heterogeneidad y por tanto de la complejidad y no-linearidad de la respuesta hidrológica. Desde el punto de vista de comprensión de los procesos hidrológicos que determinan la respuesta, esta escala se ha abordado fundamentalmente desde la modelización hidrológica con base física mediante la agregación de sub-procesos que *a priori* se consideran relevantes, requiriendo previamente una calibración mediante ciertos parámetros medidos en el campo. Este planteamiento se enfrenta ante el grave problema de equifinalidad (*equifinality*) y de incertidumbre asociada (Beven, 2002). Hasta el momento no se han conseguido

resultados realmente satisfactorios en este sentido. Sin embargo, a partir de la instrumentación de cuencas se conoce el elevado grado de complejidad de la respuesta, que además se enfrenta a la variabilidad espacial de las precipitaciones (Beven, 2002).

Cammeraat (2002) muestra el comportamiento de la escorrentía a través de un amplio rango de escalas anidadas, ilustrando el elevado grado de complejidad y no-linearidad del proceso (Figura 1.4). Se detectan diferentes umbrales de respuesta dependiendo de la escala, siendo variables las relaciones de magnitud de la precipitación - frecuencia de escorrentía. Esta variabilidad se atribuye a la existencia de diferentes umbrales de conectividad entre las diferentes escalas.

1.1.6 Funciones hidrológicas transferidas al eco-geo-sistema

Hasta el momento nos hemos referido a aspectos de **funcionamiento** del sistema en términos hidrológicos que incluye la manera de auto-organización del sistema en diferentes niveles de escala en orden jerárquico. A la vez hemos visto que el interés en la investigación se centra en los mecanismos de retroalimentación implicados; los procesos clave en cada nivel y la detección de umbrales de funcionamiento, con especial hincapié en los umbrales de conectividad.

Sin embargo, sobrepasando el interés meramente hidrológico, también es importante destacar las **funciones** o **servicios** que desempeñan los procesos hidrológicos en el campo de otras disciplinas afines como la geomorfología y la ecología, las cuales incorporan el comportamiento hidrológico como un factor de control e interacción en el seno de los procesos propios de sus respectivos dominios de análisis. Es conveniente resaltar que esta fragmentación disciplinar atiende a requisitos propios del análisis de los diferentes subsistemas. Siendo conscientes de la mutua y permanente interacción entre los aspectos ecológicos, hidrológicos y geomorfológicos, hay un reconocimiento cada vez mayor de la necesaria cooperación interdisciplinar en el análisis e interpretación de los procesos (Porporato *et al.*, 2002; Bond, 2003; Paola *et al.*, 2006; Tetzlaff *et al.*, 2007; Dollar *et al.*, 2007; Fisher *et al.*, 2007; Renschler *et al.* 2007; Post *et al.*, 2007).

Desde la ecología, el principal y más directo interés hacia las funciones hidrológicas se ha referido a los mecanismos de **funcionamiento interno de los ecosistemas** (Figura 1.5) en términos de redistribución y aprovechamiento de recursos (agua y nutrientes). Este aspecto es en ambientes semi-áridos el principal factor limitante en el desarrollo de la vegetación. Este aspecto involucra las consideraciones hidrológicas a las escalas espaciales de intra- e inter-parche (*patch* y *stand scale*). En segundo lugar, se está diversificando el interés hacia la **eficiencia global de los ecosistemas en la retención de recursos** a largo plazo, en relación a los patrones espaciales de distribución de la vegetación (Figura 1.5).

Desde el campo de la geomorfología, el interés por los procesos y flujos hidrológicos y toda su diversidad de manifestaciones (escorrentía superficial difusa o concentrada; flujo subsuperficial, etc.) viene dado por constituir agentes modeladores de la superficie de primer orden en todas las escalas espacio-temporales. En este sentido la geomorfología centra su atención en el balance entre la movilización-arranque (*detachment*) de sedimento, su transporte y sedimentación. Además las

cuestiones de conectividad entre unidades geomorfológicas son objetivo prioritario desde esta disciplina.

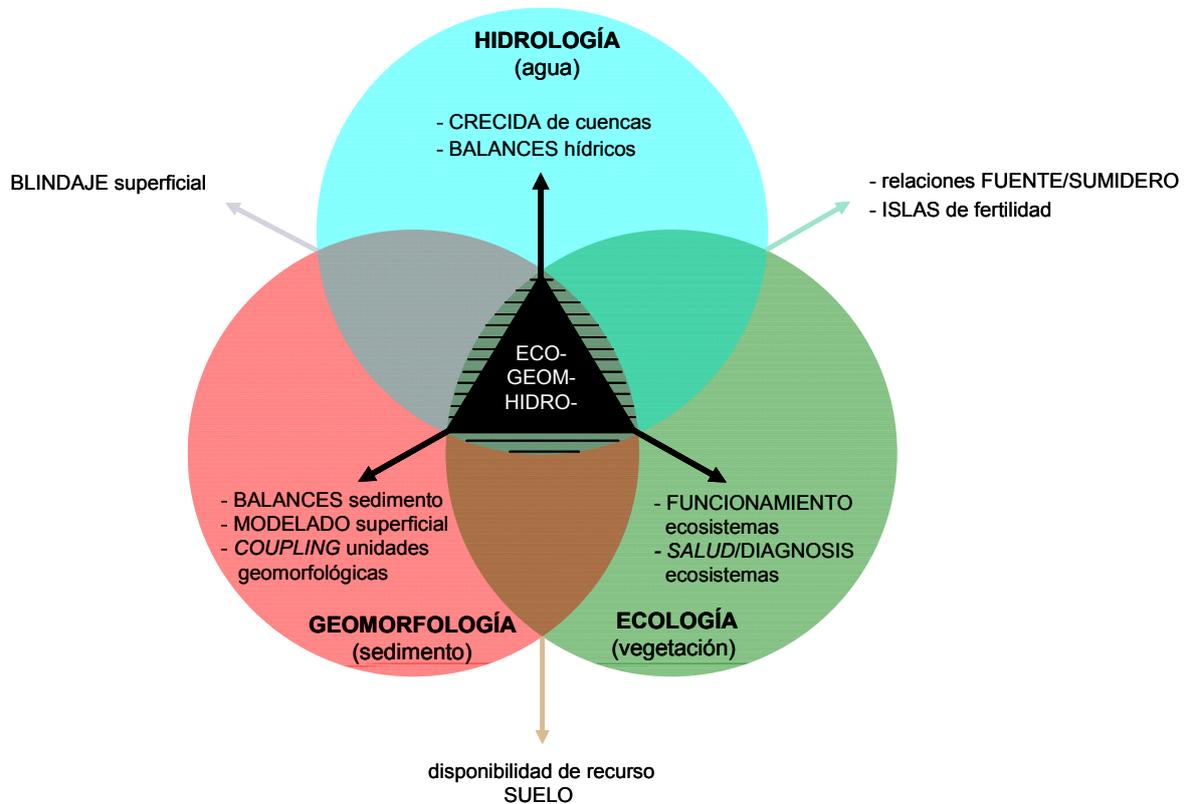


Figura 1.5 Croquis sintetizando **funciones/servicios** hidrológicos en ecología y geomorfología.

Relaciones eco-hidrológicas / hidro-ecológicas.

Desde el punto de vista del funcionamiento interno de los ecosistemas semiáridos, la ecohidrología resalta la importante función de la redistribución del flujo superficial desde espacios desnudos a los vegetados en el incremento general de la producción y diversidad vegetal en relación a su limitada pluviometría. Diversos autores se refieren al establecimiento de un *nuevo estatus en la disponibilidad de recursos del sistema* (Noy-Meir, 1973; Aguiar y Sala, 1999), que se alcanza gracias a la existencia de un patrón de distribución de la vegetación heterogéneo que permite una concentración espacial del agua (y nutrientes) (Figura 1.6), suponiendo esto una ventaja comparativa respecto a patrones de distribución homogénea. En síntesis, se consigue mediante una estrategia de reorganización espacial de la vegetación una optimización de recursos en ambientes de elevada restricción hídrica.

Asimismo, desde la modelización matemática, se ha puesto de manifiesto que este proceso de redistribución del flujo puede ser el principal responsable del origen y mantenimiento de los patrones de distribución de la vegetación en ecosistemas áridos y semiáridos, referidos tanto a patrones regulares como irregulares (HilleRisLamberg *et al.*, 2001; Rietkerk *et al.*, 2002; Zeng *et al.*, 2005). Estos avances desde la modelización respaldan numerosos los resultados obtenidos a partir de

observaciones en campo en distribuciones regulares en banda de la vegetación (Galle *et al.*, 1999; Valentín y D'Herbes, 1999; Ludwig *et al.*, 1999 y 2005), resultados que apuntan hacia un **control dinámico** en la formación de patrones de vegetación.

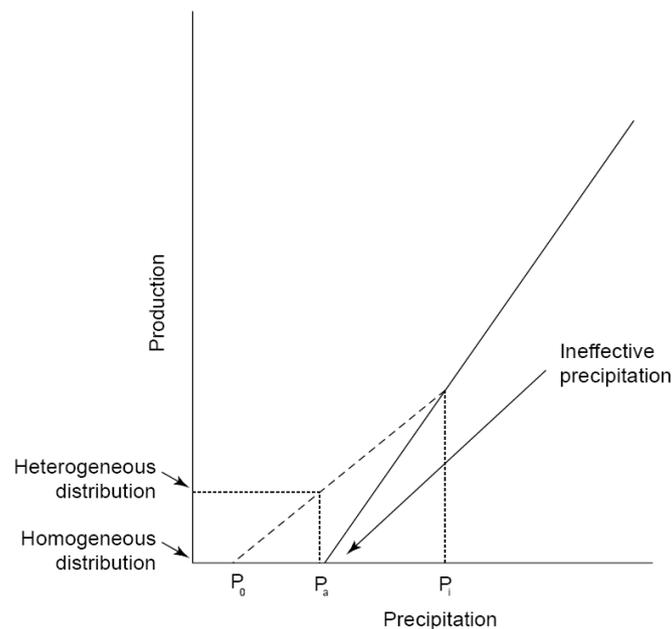


Figura 1.6 Esquema conceptual sobre el *nuevo estatus* del sistema en términos de optimización en el aprovechamiento de los recursos a partir de una estrategia de adopción de distribuciones heterogéneas, en Aguiar y Sala, 1999. Pie de figura de los autores: Relación hipotética entre precipitación media anual y producción en ecosistemas áridos y semiáridos (línea continua). En ecosistemas con una distribución homogénea de individuos de plantas, aquellos que reciben una precipitación igual a P_a les corresponde una producción de cero al encontrarse por debajo del umbral de producción (i.e. precipitación ineficaz). Los ecosistemas con una distribución heterogénea de individuos tienen otra función que relaciona producción y precipitación (línea discontinua). Los espacios de baja cobertura (áreas fuente) perderán agua, causando un cambio en el estatus desde P_a a P_0 sin cambiar su producción, que es igualmente cero. Los parches de elevada cobertura (áreas sumidero) tendrían mayor disponibilidad de agua, P_i , como resultado del agua que le llueve directo más del agua de escorrentía de arriba (*run-on*). Si la disponibilidad de agua es igual a P_i , la producción será superior a cero y por tanto la producción en ecosistemas heterogéneos será mayor.

Más recientemente, el interés desde la ecología se ha extendido a las capacidades o eficiencia del **sistema en conjunto** de retener los recursos, concretamente del agua producida por la escorrentía, y asociado a ésta, la vulnerabilidad del sistema a los procesos de erosión del suelo. Esta eficiencia, considerada como un indicador de la *salud del sistema*, se asocia a las propiedades de la configuración espacial de la vegetación, la cual se comporta como sumideros netos de la escorrentía. Así pues, se entra en el dominio de los procesos hidrológicos a escala de ladera, en el que la determinación de la conectividad superficial de los espacios desnudos es uno de los objetivos clave en que actualmente se centra la atención. En este sentido son pioneros el grupo australiano del CSIRO en los esfuerzos por establecer un marco conceptual y procedimientos de medida adecuados a la detección de condiciones disfuncionales en los ecosistemas semiáridos. Tongway y Hindley

(2004) desarrollan un protocolo pormenorizado de análisis en el que tienen en consideración ciertos aspectos de estructura espacial de la vegetación en conjunción con análisis de las propiedades del suelo (Figura 1.7). Ludwig *et al.* (2002, 2007) han desarrollado un índice de *Permeabilidad* de escorrentía (*Leakiness Index*) que aplican a mapas de vegetación y suelo desnudo extraídos a partir de imágenes de fotografía aérea y de satélite. Imeson y Prinsen (2004), en una línea similar de análisis de mapas de vegetación y suelo desnudo, pero a partir de índices de métrica espacial proponen la posibilidad de ser utilizados como indicadores de degradación de los ecosistemas. Mayor *et al.* (2008) desarrollan un nuevo índice de Longitud del Flujo (*Flow Length index*) como propuesta de cuantificación de la conectividad de la escorrentía superficial. En otra línea diferente al desarrollo de propuestas de índices para la parametrización de la conectividad de las áreas desnudas, Boer y Puigdefábregas (2005) mediante simulación de patrones de vegetación/suelo desnudo abordan la influencia del carácter genérico del patrón de vegetación (tamaño de grano fundamentalmente) en las probabilidades de conectividad de la escorrentía.

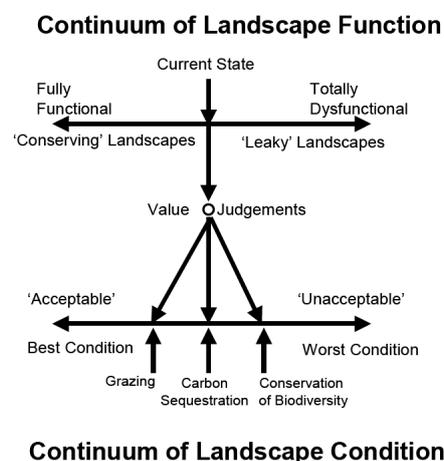


Figura 1.7 Conceptualización de la valoración o diagnóstico de la *condición* del entorno para cualquier uso en relación a su *funcionalidad* en términos de regulación de recursos, en el marco del *Landscape Functional Analysis* en Tongway y Hindley, (2004).

Interacciones hidro-geomorfológicas.

La evidente interrelación entre hidrología y geomorfología adquiere en ambiente mediterráneo una relevancia sustancial al considerarse la arroyada superficial uno de los principales agentes geomórficos. Estas interacciones están presentes en las diferentes escalas de análisis, en las que las condiciones y umbrales de conectividad hidrológica son un aspecto clave y que recientemente está experimentando un creciente interés.

En el seno de la unidad **ladera**, la consideración de los **patrones y procesos de redistribución y balance general de sedimento** (arranque, transporte y sedimentación) es una cuestión fundamental en geomorfología que, en última instancia, influye a largo plazo en la evolución y morfología de las laderas. Concretamente, en un contexto de análisis de los procesos de degradación del suelo y erosión, Thornes *et al.* (1996) centra la atención en las interrelaciones entre los subsistemas clima-

vegetación-suelo-superficie (Figura 1.8-Izq.), obteniendo como resultado la detección de tres ciclos de retroalimentación fundamentales que gobiernan la dinámica de funcionamiento del sistema (Kirkby, 1996, en Figura 1.8-Dcha.): (i) ciclo orgánico; (ii) ciclo erosivo y (iii) ciclo de blindaje superficial (*soil surface armouring*).

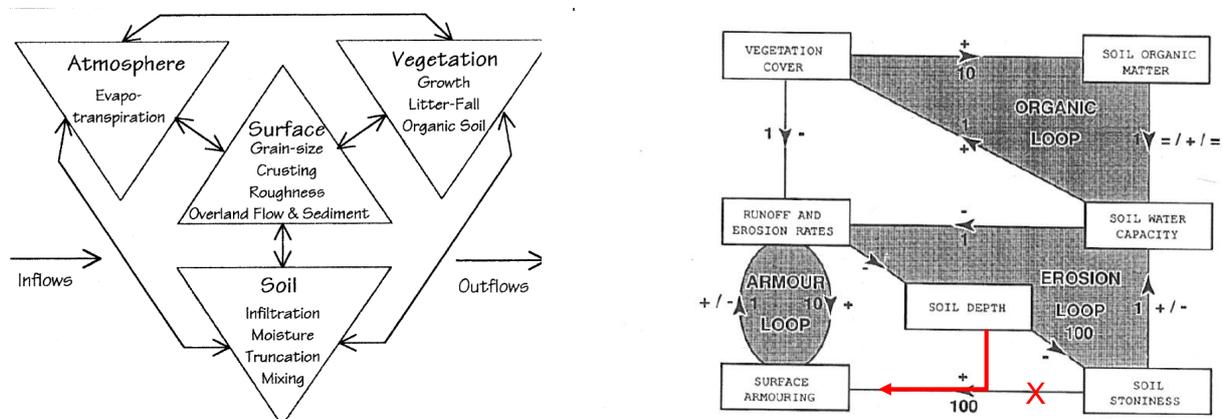


Figura 1.8 Marco conceptual del proyecto europeo MEDALUS, (Izq.) modelo de interrelación dinámica de los diferentes elementos del sistema, en (Thornes *et al.* (1996) y (Dcha.) bucles de retroalimentación que definen las interrelaciones dominantes en los procesos implicados en la desertificación, en Kirkby *et al.* (2002). (*) Por cuestiones metodológicas, a lo largo de la tesis readaptamos este esquema original, sustituyendo el “contenido de piedras del suelo” por la “profundidad de suelo” como variable control del bucle de erosión sobre el ciclo de blindaje superficial.

En los procesos de escorrentía y erosión superficial se observa una relación siempre negativa y en un único sentido con la componente de cobertura vegetal, mientras que sin embargo, la relación de estos procesos superficiales con la fracción de **cobertura abiótica** del suelo adquiere un mayor grado de complejidad, al identificarse un ciclo de retroalimentación individualizado de **blindaje superficial** (sellado superficial debido a una elevada cobertura de fragmentos rocosos). Este bucle está sujeto a una condición de umbral en relación al grado de cobertura de fragmentos rocosos sobre la superficie del suelo: (i) en los casos de escaso blindaje superficial se produce un aumento en las tasas de escorrentía y erosión, mientras que (ii) con elevado blindaje estas tasas muestran una reducción (Figura 1.8-Dcha.). Este comportamiento ambivalente de los procesos de escorrentía y movilización de sedimento en función las características de la fracción de cobertura abiótica tiene importantes implicaciones en la dinámica general del sistema, más aún teniendo en cuenta que el grado de blindaje superficial es así mismo reversible, siempre en los límites de la disponibilidad de profundidad de suelo y la presencia de fragmentos rocosos. En este sentido son destacables las aportaciones realizadas desde el punto de vista experimental en referencia al papel de los fragmentos rocosos en los procesos de desertificación en el mediterráneo (Poesen *et al.*, 1994; Poesen y Bunte, 1996; Poesen *et al.*, 1999; Neave y Rayburg, 2007; Rieke-Zapp *et al.*, 2007). Más recientemente existe además el interés por la simulación mediante modelización de los procesos de blindaje superficial a escala de cuenca (Cohen *et al.*, 2008; Sharmeen y Willgoose, 2007; Sharmeen y Willgoose, 2006).

Otro importante aspecto relacionado con los flujos de redistribución de sedimento en la dinámica geomorfológica de ladera es la posibilidad de **modificación de la (meso) topografía** debido al efecto barrera ejercido por la vegetación (especialmente en el caso de macollas de herbáceas). Se ha evidenciado la formación de pedestales bajo los matas de vegetación en laderas de elevada pendiente donde se registra una importante movilización de sedimento (Gallart *et al.*, 1993; Sánchez y Puigdefábregas, 1994; Bochet *et al.*, 2000). Mediante modelización también se ha conseguido reproducir este efecto (Sánchez y Puigdefábregas, 1994), además de los patrones generales de distribución espacial de la vegetación característicos (Gallart *et al.*, 1993). Este desarrollo de una meso-topografía que podríamos denominar *funcional*, debe tener importantes implicaciones en las dinámicas de los flujos de agua y sedimentos, y por tanto, en la propia conectividad de la escorrentía.

Sobrepasando la escala de ladera, otra de las funciones clave de la hidrología es la **conexión entre diferentes unidades geomorfológicas**, siendo la más fundamental el acople o desacople (*coupling-decoupling*) entre ladera y canal (Brunsdem y Thornes, 1979; Harvey, 2001; Chiverrell *et al.*, 2009; Harvey, 2012). Esta conectividad se entiende en términos de transferencia de agua (y sedimentos) del sub-sistema ladera al sub-sistema cauce (Figura 1.9), aportaciones que se producen bien en forma de escorrentía superficial o bien en forma de flujo sub-superficial. Este es todavía un tema escasamente tratado pero que recientemente está comenzando a ser un tema de creciente interés (Bracken y Croke, 2007; Faulkner, 2008; Faulkner *et al.*, 2008; Hooke, 2006; Koch *et al.*, 2009; Jencso *et al.*, 2009; Croke *et al.*, 2005). Las principales limitaciones a la hora de abordar este tema fundamental son los escasos resultados concluyentes sobre la propia dinámica en la conectividad hidrológica en la escala inmediatamente anterior, la escala de ladera. Sin embargo, a partir de experiencias de monitoreo de eventos con diseños multiescala (de ladera y cauce anidadas), se evidencia un comportamiento complejo y no-lineal (Puigdefábregas *et al.*, 1998; Cammeraat, 2002-2004), fuertemente determinado por las condiciones antecedentes de humedad del suelo (James y Roulet, 2007) y las características y secuenciación de los propios eventos de precipitación. Desde el campo de la modelización hidrológica a escala de cuenca, Lesschen *et al.*, (2009), añade a un modelo distribuido de base-física (modelo LAPSUS, Schoorl *et al.*, 2002) consideraciones sobre los patrones de vegetación y la interferencia en la respuesta de los sistemas de terrazas de cultivo, constituyendo un considerable avance en el intento de incorporación de procesos intermedios en la respuesta de cuenca.

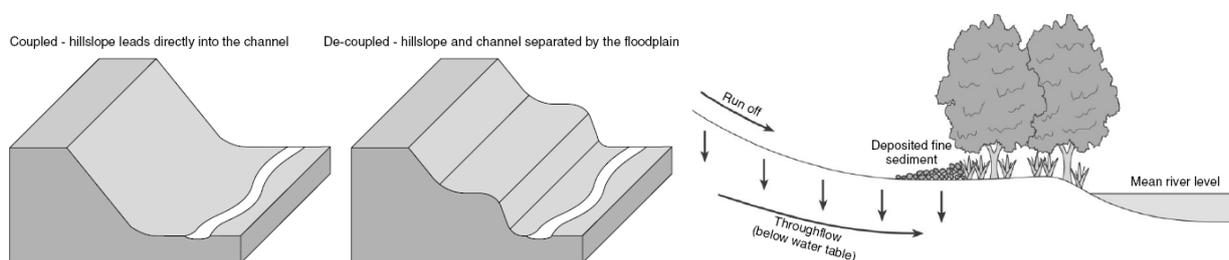


Figura 1.9 Ilustración de diferentes estados de conectividad del sistema: conexión (*coupling*) y desconexión (*de-coupling*) entre ladera y cauce, en Bracken y Croke, (2007).

Desde el punto de vista de la conectividad sedimentológica propiciada por la conexión hidrológica pero añadiendo además procesos geomorfológicos de base gravitacional (erosión de los márgenes

laterales, caídas en masa), Hooke (2003) ha sabido desarrollar metodologías basadas en cartografía de campo que han servido para avanzar en el estado de conexión ladera cauce y en la identificación de las fuentes de sedimento. Además desde el funcionamiento de geomorfológico de grandes ríos australianos (Fryirs, 2007) ha definido desde el punto de vista geomorfológico los nodos de conectividad sedimentológica de las cuencas y su variación en relación a los cambios de uso del suelo acontecidos en las mismas.

En otro orden de procesos, referentes a la evolución geomorfológica en el Holoceno, pero manteniendo el interés en la conectividad entre unidades geomorfológicas están los trabajos en la línea de Chiverrell *et al.* (2009). En términos más globales y referidos a la conectividad a escala de paisaje pero considerando las diferentes escalas de conectividad está el trabajo de Brierley *et al.*, (2006).

De Vente y Poesen (2005) presentan un modelo conceptual de producción de sedimentos en función de la escala, tanto de las áreas fuente de sedimento como de las áreas de almacenamiento (Figura 1.10), el cual muestra de una manera muy gráfica las relaciones escalo-dependientes también presentes en la movilización de sedimento. En cada escala espacial se identifican los procesos erosivos dominantes que determinan un comportamiento no-lineal. Este comportamiento no-lineal depende en gran parte de la cantidad de sedimento movilizado y de la prevalencia de una fase erosiva u otra a determinada escala espacial. Así, a escalas finas la movilización de sedimentos aumenta con el tamaño de la cuenca de drenaje hasta un determinado umbral, el cual es dependiente de otros factores (litología, usos del suelo, etc. de Vente *et al.*, 2007). Sobrepasado este umbral, a mayor área de drenaje las cuencas se convierten en sumideros de sedimento, que queda almacenado en distintos depósitos coluviales y aluviales.

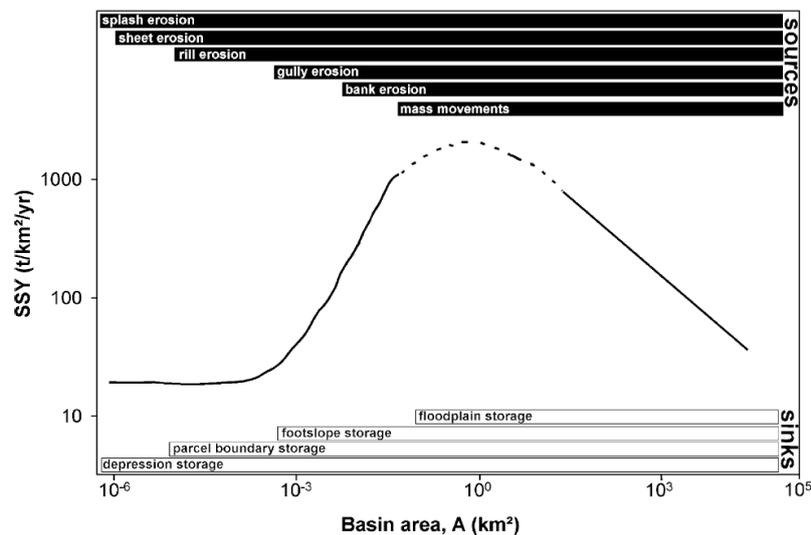


Figura 1.10 Modelo conceptual de producción de sedimento a varias escalas y contribución de fuentes y sumideros, en de Vente y Poesen (2005).

1.2 NUEVOS RETOS Y APROXIMACIONES METODOLÓGICAS

Los retos **futuros** se centran en la conceptualización de procesos a escala de **ladera** y, por extensión, en las relaciones escalares hacia el contexto de **cuenca** (Tetzlaff *et al.*, 2008). Desde el dominio de la **experimentación**, que es desde donde se ha trabajado en la comprensión del funcionamiento eco-hidro-geomorfológico en los niveles de **escala inferiores** a la ladera, se ha producido un extraordinario avance en las últimas décadas (Figura 1.11-Izq.), habiéndose sistematizado las interrelaciones entre los diversos componentes del sistema. A este respecto, son dos los aspectos que debemos destacar: (i) la identificación de los ciclos de **retroalimentación** clave en la regulación de su dinámica, y, en estrecha relación a esto, (ii) las evidencias de **auto-organización espacial** del sistema hacia una mayor eficiencia en la gestión de recursos (optimización de agua-suelo-nutrientes). Este último aspecto afianza el marco general de investigación centrado en el análisis de las relaciones **proceso-patrón** (i.e. funcionamiento vs. estructura).

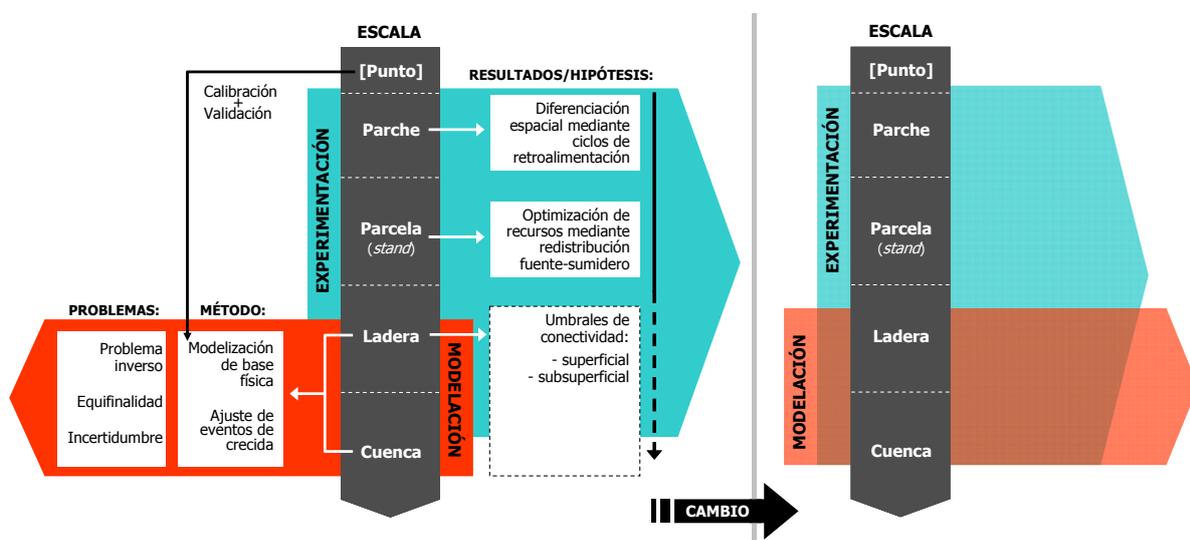


Figura 1.11 Síntesis de las diferentes trayectorias que se observan en la interrelación entre los ámbitos de la experimentación y de la modelización en cuanto a escalas y aproximaciones. (Izq.) Corriente general, actual y pasada, en la investigación en hidrología-geomorfología donde se produce una divergencia entre ambos ámbitos, con una escasa cooperación y (Dcha.) el reciente cambio que se observa de convergencia entre ambos, reclamándose un acercamiento del ámbito de la modelización a los resultados e hipótesis provenientes del campo de la experimentación.

Desde el otro extremo, el del ámbito de la **modelización hidrológica**, cuyo dominio natural y tradicional de estudio es la **escala de cuenca** (Figura 1.11-Izq.), existen gran cantidad de modelos de distintos tipos con una gran variedad tanto en la demanda de datos de entrada como en la validez de los resultados (deVente y Poesen, 2005). Desde los propios hidrólogos se apunta que las principales **causas** de este **general fracaso** radican en que la modelización va dirigida fundamentalmente al ajuste de crecidas y con la consiguiente aparición del *problema inverso* (*inverse problem*) en las propias bases de modelización. Como resultado de esto y en balance, el actual paradigma se enfrenta a los **problemas** de equifinalidad e incertidumbre. Este panorama imposibilita la extrapolación de resultados dirigidos a la predicción en cuencas no aforadas (**PUB: Prediction in Ungauged Basins**), que puede entenderse como uno de los fines principales de la hidrología como disciplina (principio de universalidad). Éste es un tema que se ha posicionado en el centro de investigación a raíz de la

instauración del grupo de trabajo de colaboración internacional PUB-Sivapalan desde mediados de los '90. En este contexto son múltiples las voces en el seno de la hidrología que claman la necesidad de un aporte de **nuevas ideas** hacia quizás una profunda **renovación metodológica y de paradigma general** de la disciplina. Si bien, este proceso de renovación metodológica no está exento de polémica, puesta de manifiesto en el público enfrentamiento dialéctico iniciado entre dos prestigiosos hidrólogos Beven y Sivapalan (ver Sivapalan, 2009).

Tal y como McDonnell *et al.*, 2007 apunta, la corriente mayoritaria actual en modelización hidrológica de cuenca está basada en teorías referidas a sub-procesos físicos bien conocidos y correspondientes a una escala de mucho detalle, como es el caso de la ley de Darcy y la ecuación de Richards montadas en ecuaciones de balance de masa y momento cinético, reconociendo que la arquitectura básica de estos modelos se deriva directamente del trabajo pionero de Freeze y Harlan (1969) (Beven, 2002). Sin embargo, debido a la **dependencia escalar** que presentan los sistemas naturales alejados de un comportamiento lineal, se reconoce la necesidad del desarrollo de instrumentos y metodologías de salto de escala (*scaling-up*), a modo de **reglas de escalado**, en un sentido de identificación de relaciones proceso-patrón clave que gobiernan el funcionamiento de los sistemas. En este sentido no resultan suficientes los modelos espacialmente distribuidos, que manteniendo la estructura de sub-procesos de base física pero valiéndose de la discretización del espacio en grandes unidades de respuesta, no constituyen una propuesta de regla de escalado apropiada.

También se insiste en que debe potenciarse la convergencia y transferencia entre los dominios de la **experimentación** en campo y de la **modelización**, de modo que se refuerce la necesaria retroalimentación y creación de sinergias que permite el avance en la comprensión de los procesos (Dunn *et al.*, 2008; Tetzlaff *et al.*, 2008). En este sentido sería necesario la existencia de un marco de trabajo común que afiance estas interrelaciones (Seppelt *et al.*, 2009; Troch *et al.*, 2009). La Figura 1.11 ilustra la divergencia entre el ámbito de la experimentación y de la modelización en cuanto a escalas y aproximaciones, que desde las nuevas voces que piden un cambio de paradigma reclaman una aproximación de ambos ámbitos de manera que se unifiquen procedimientos y, especialmente, que se aborde la cuestión escalar de manera íntegra.

Tanto el análisis **experimental** como la **modelización** se enfrenta a un dominio de extrema **heterogeneidad** espacial (McDonnell *et al.*, 2007) con fuertes interacciones entre los diferentes elementos del sistema, por lo que es necesario una mayor colaboración y enfoques **interdisciplinares** hacia la comprensión de cómo los mecanismos de retroalimentación objeto de las diferentes disciplinas afectan a la evolución y funcionamiento de la cuenca (Troch *et al.*, 2009). Existe una nueva ola de trabajos en los que se fija la atención en los procesos a escala más fina y se incorporan factores geomórficos (orientación, unidades geomorfológicas) y ecológicos (vegetación).

Además se destaca la necesidad de simultanear estudios comparativos en diferentes **contextos geográficos**, con el propósito de sistematizar las diferencias entre áreas respecto de los formas y respuestas, y así alcanzar sistemas de clasificación que permita un mayor grado de sistematización de la comprensión de procesos (Tetzlaff *et al.*, 2008). De este modo se pretende ir más allá del excesivo localismo en los resultados y conclusiones hasta ahora obtenidos, buscando una mayor universalidad

en el conocimiento. Para ello es necesaria una coordinación mediante una adecuada definición de objetivos, incluso metodologías de campo.

Así pues, actualmente está abierto un fuerte e interesante debate respecto de la renovación de la hidrología, que si bien es más reciente y explícita en esta disciplina, los retos aquí considerados sobrepasan el aspecto meramente hidrológico, produciéndose en el **conjunto de disciplinas afines** como la **geomorfología y la ecología** una continua búsqueda de formas alternativas de afrontar la complejidad de los sistemas naturales. Concretamente, la manera de abordar la investigación hidrológica afecta directamente a los avances en la investigación de procesos y modelización en el campo de la **geomorfología**, pues ésta incorpora directamente en la estructura de sus modelos los procedimientos vigentes en el actual paradigma hidrológico, en el cual impera una tipología de modelización de base-física.

1.2.1 Características clave del sistema como premisas fundamentales de trabajo: lecciones aprendidas.

Actualmente se dispone ya de una probada experiencia en las características y respuestas genéricas de los sistemas naturales, concretamente en ambiente semi-árido, siendo el resultado de una extensa labor de experimentación y monitoreo. Esto nos permite alcanzar un grado de conceptualización de las propiedades genéricas de estos sistemas que nos pueden servir como premisas en las nuevas aproximaciones futuras.

Una característica propia de ambientes de transición, en el que el clima Mediterráneo y todas sus variantes se sitúa, es que la cuestión geo-eco-hidrológica se configura en un contexto de marcada **heterogeneidad** presente (i) en la dimensión **espacial** en cuanto a una intrincada configuración en mosaico a diferentes escalas, y (ii) **temporal** en lo referente a la ocurrencia/secuenciación de eventos, eminentemente referidos al régimen de precipitaciones. Lavee *et al.* (1998) pone un especial énfasis en este aspecto de la variabilidad espacial de las propiedades superficiales del suelo para explicar la respuesta hidrológica general. Aguiar y Sala (1999) por su parte, asignan a esta propiedad de heterogeneidad un papel fundamental en la habilidad de estos ecosistemas en la optimización de recursos frente a una organización espacial homogénea (Figura 1.6). Más recientemente, y en el contexto de la hidrología, se ha puesto el acento en la heterogeneidad espacio-temporal, como un tema a abordar desde nuevas perspectivas (ver McDonnell *et al.*, 2007; Troch *et al.*, 2009).

Estrechamente relacionado con esta heterogeneidad, la respuesta del sistema muestra un comportamiento **complejo** y **no-lineal** en sus múltiples manifestaciones (Phillips, 2003). La **complejidad** de un sistema se incrementa a medida que aumenta la diversidad de interrelaciones entre elementos del sistema. Ésta diversidad es función de (i) la propia diversidad de componentes y (ii) de las combinaciones efectivas –las que tienen lugar- de interrelación entre estos componentes. Por otra parte, un sistema **no-lineal** es aquel cuya respuesta (outputs) no es proporcional a la magnitud de las entradas (*inputs*). Phillips (2003) repasa para sistemas geomorfológicos, las diferentes fuentes de no-linealidad, que en su mayoría y de forma genérica, pueden asimilarse a situaciones sensibles a la ocurrencia de umbrales críticos en el funcionamiento general del sistema.

Otra característica derivada de la experiencia en el análisis y en la conceptualización de sistemas naturales, es que éstos presentan una **estructura interna de organización** (O'Neill, 1986; O'Neill *et al.*, 1989; deBoer, 1992; Allen y Holling, 2002). Esto se evidencia en las **relaciones de escalodependencia** identificadas en la respuesta de los procesos (Cammeraat, 2002; de Vente y Poesen, 2005). La consecuencia más directa es que no es posible una extrapolación directa y lineal de las respuestas de una escala a otra, debiendo dirigir los esfuerzos en el cambio de escala hacia los procesos control en cada uno de los niveles (Cammeraat, 2002).

1.2.2 Marco metodológico de aproximación de los nuevos retos.

En este panorama de propiedades clave del sistema a tener en cuenta y contextualizados los nuevos retos, lo siguiente es dar respuesta al cómo afrontar todas estas cuestiones. Ofrecemos en este capítulo una propuesta de un posible marco metodológico general desde el que abordar todas estas cuestiones, siempre desde los avances del conocimiento.

La aproximación desde la **Teoría General de Sistemas** (Chorley y Kennedy, 1971; vonBertalanffy, 1973) es el marco metodológico-teórico seminal en el que se fundamenta el resto de aportaciones metodológicas, cuyos principios siguen completamente vigentes en el paradigma actual, que no por sobreentendidos deben por ello ser obviados. Así, las características fundamentales que definen a un sistema son (Figura 1.12):

- (1) Los sistemas presentan una **estructura interna** que los caracteriza, la cual se define según los **elementos** que los componen y el **modo en que se interrelacionan** (ciclos de retroalimentación, umbrales, etc.).
- (2) La consideración del sistema en su globalidad da un resultado mayor que la suma de sus partes, y esto como resultado de las sinergias que se producen entre los elementos que lo componen. Su funcionamiento se basa en el juego de "**emergencia**" de propiedades nuevas en un contexto de "**restricciones**" (*constraints*).
- (3) Los sistemas también se caracterizan por la **transmisión de materia, energía y/o información** entre los diferentes elementos y niveles del sistema.

En torno a estas bases del análisis sistémico ya existe un cuerpo metodológico de aproximación y definición de los geo-ecosistemas basado, fundamentalmente, en las aportaciones por parte de la ecología (O'Neill, 1986; Holling, 1992), si bien desde el mundo de la geomorfología son destacables los avances en este aspecto en las décadas de los 60's, 70's y 80's (Chorley y Kennedy, 1971).

En lo referente a la estructura interna de los sistemas, existe un amplio consenso en que los geo-ecosistemas se organizan en una **estructura jerárquica** de diferentes niveles de escala **anidados** (Figura 1.13) (Holling, 1992; Berckamp, 1998; Cammeraat, 2002; Dollar *et al.*, 2007; Yarrow y Salthe, 2008) cuyos principios de funcionamiento se han establecido en la llamada Teoría Jerárquica (O'Neill, 1986 en ecología). Este aspecto en la conceptualización de los geo-ecosistemas tiene directas y fundamentales implicaciones en el recurrente problema de la **escala**.

La siguiente cuestión, directamente relacionada con la anterior, es la manera en que se produce y organiza la **trasmisión de materia y energía** entre sus componentes y niveles de escala, o lo que es lo mismo los **procesos o mecanismos de interacción** entre ellos. En este sentido los **ciclos de retroalimentación** son, desde el punto de la dinámica temporal de los sistemas, los principales mecanismos de regulación interna. Los cuales a su vez dependen de los patrones de auto-organización emergentes y de las restricciones impuestas.

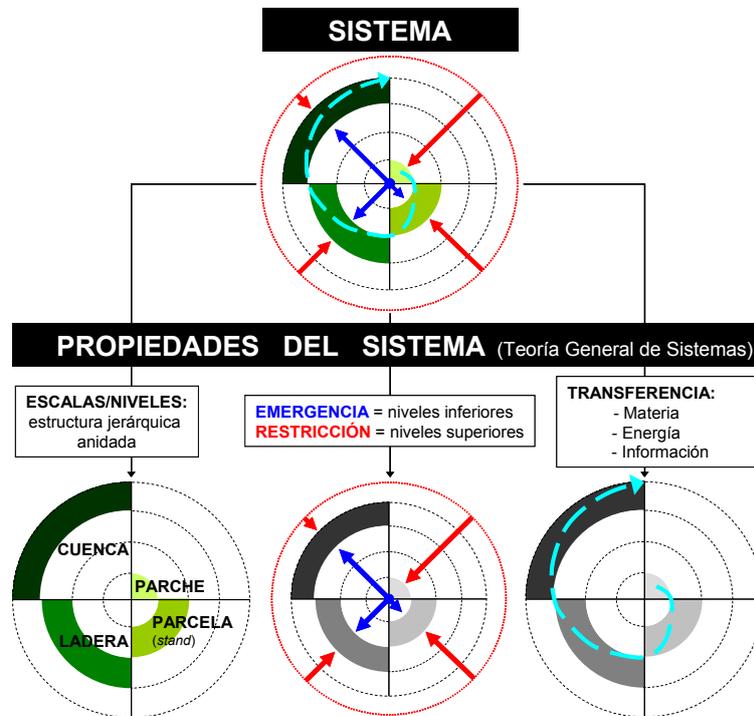


Figura 1.12 Descomposición de un Sistema en sus tres propiedades fundamentales en base a la Teoría General de Sistemas, ejemplificado según un sistema natural.

El concepto que vincula los anteriormente citados es el de **umbral**, el cual tiene múltiples manifestaciones y contextualizaciones dentro del funcionamiento general de los sistemas (Briske *et al.*, 2006; Zehe y Sivapalan, 2009), pero que en esencia debe entenderse como valores de una determinada variable que desencadena una transición o cambio de estado en algún aspecto o globalidad general del sistema. Puede tener un origen exógeno (presión de origen externo) o interno (e.g. umbral geomorfológico) al sistema. En última instancia, la **respuesta no-lineal** de los sistemas es responsabilidad de un funcionamiento regido por la existencia de umbrales, cuya respuesta es además **sensible a las condiciones iniciales**, cuyo ejemplo paradigmático es el caso de las condiciones de humedad antecedente del suelo en la respuesta a la escorrentía.

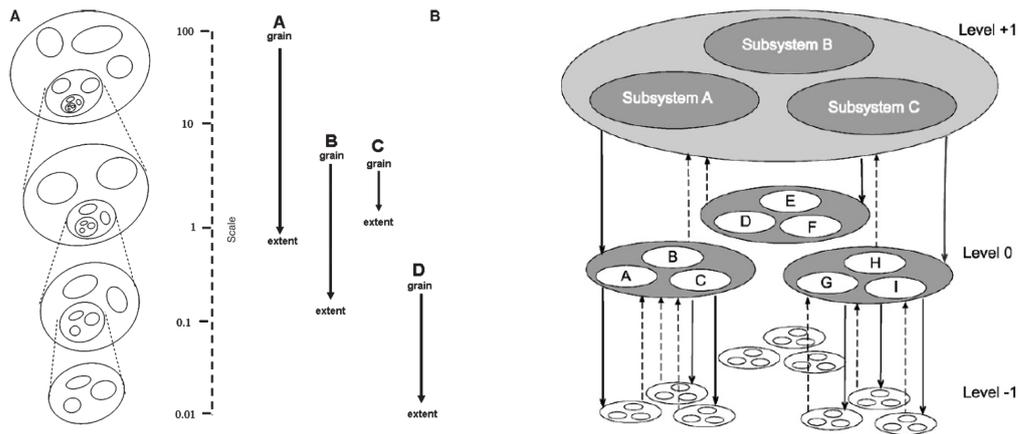


Figura 1.13 Esquematización habitual de la estructura de organización interna de los geo-ecosistemas en niveles de escala jerárquicos y anidados: (Izq.) en Dollar *et al.* (2007); (Dcha.) en Yarrow y Salthe (2008).

El concepto de **conectividad** se asocia con todo lo anterior en el sentido que es una cualidad que en última instancia rige la transferencia dentro del sistema. Así, las condiciones de conectividad son clave en el funcionamiento de los sistemas promoviendo las interrelaciones entre elementos y niveles de escala mediante flujos de materia y energía. Es entonces apropiado hablar en términos de **umbrales de conectividad**, más aún cuando la dinámica del sistema se rige en un contexto de *eventos gatillo (trigger events)*, los cuales son eventos de precipitación de extrema variabilidad en frecuencia y magnitud, (Noy-Meir, 1973; Ludwig *et al.*, 2005, en Figura 1.14), cuya consecuencia fundamental es la continua interrupción y reactivación de procesos. Además incorporando la elevada variabilidad en condiciones iniciales resultado de esta propia dinámica (Figura 1.14-Izq.).

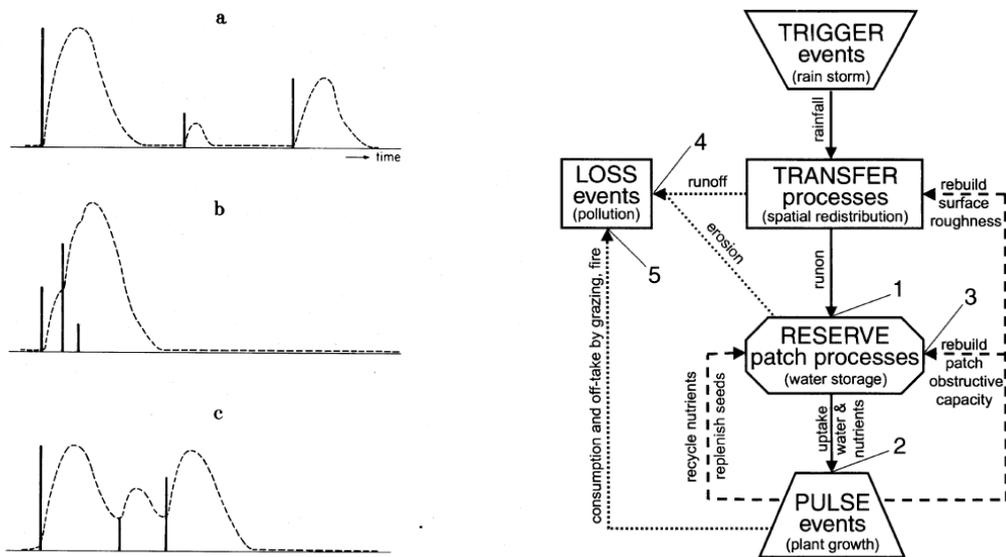


Figura 1.14 Conceptualización de los eventos de respuesta en sistemas semiáridos: (Izq.) Describe la importancia de la secuenciación en la distribución temporal, magnitud y frecuencia de los eventos de precipitación en la respuesta del sistema, en Noy-Meir (1973); (Dcha.) Marco conceptual que descompone en subprocesos o estadios la ocurrencia de eventos respuesta, en Ludwig *et al.* (2005).

Pese al creciente interés que está experimentando el tema de la conectividad en múltiples disciplinas como la ecología, geomorfología y la hidrología, está todavía pendiente la **conceptualización precisa del término** (Bracken y Croke, 2007; Michaelides y Chappell, 2009; Cantón *et al.*, 2011), si bien la tendencia es a una adecuación específica del término según los diferentes campos de aplicación (ecología, hidrología, geomorfología). Además, existe una gran **indefinición de métodos y herramientas** de cuantificación, que en la misma línea de lo anterior, precisa de una adecuación al objeto concreto de estudio. Sin embargo, hay que resaltar que bajo cualquier perspectiva específica, es un aspecto unificador el sentido y la función de la conectividad como canal de interrelación entre elementos y niveles de escala.

Desde el punto de vista de la hidrología, los principios de la **Teoría de la Percolación** (*Percolation theory*) que investiga los **umbrales críticos** en los que se produce la conectividad espacial de manera generalizada es una línea abierta que promete resultados interesantes, tanto en la dominio de los procesos de flujo superficial (Davenport *et al.*, 1998, Lehmann *et al.*, 2007) como subsuperficial. Desde el punto de vista teórico-conceptual los principales avances se han obtenido desde la investigación de patrones en el seno de la Ecología del Paisaje (*Landscape Ecology*) mediante simulación a partir de la generación patrones espaciales aleatorios (*neutral modelling*). Es un reto importante la asimilación y transferencia de este tipo de aproximaciones al terreno de los procesos y mecanismos que operan en los sistemas naturales. No únicamente desde una mera aproximación descriptiva de patrones espaciales para la comprensión de otros procesos (*Landscape Ecology*), sino con un intento de profundizar en los mecanismos implicados en la respuesta del sistema.

Cuestiones fundamentales en la determinación del grado de conectividad del sistema son la **composición** y la **configuración** de los patrones de distribución. La **composición** es relevante en la medida que se ha demostrado ampliamente la gran complejidad y variación que representa ante la respuesta a la escorrentía. Sin embargo existe muy poco trabajo dirigido a la caracterización de la distribución de esta composición integrada a nivel de ladera (Kutiel *et al.*, 1998, Lavee *et al.*, 1998), aunque sí existe información sobre un estadio simplificado de vegetación/suelo-desnudo, como dicotomía fundamental en la respuesta (Imeson y Prinsen, 2004). Se considera quizás para la escala de ladera una excesiva simplificación sin que a ese nivel pueda profundizarse en la complejidad de interrelaciones que gobiernan la conectividad.

Por otra parte, la **configuración** es reflejo de las interrelaciones de los elementos integrantes (composición), la cual ha suscitado especialmente el interés y desarrollo desde la ecología del paisaje (*Landscape Ecology*), con objetivos de interrelación de los organismos vivos con el entorno (botánica y zoología). Con especial interés en la fragmentación de ecosistemas y sus consecuencias en la conectividad/aislamiento de habitats, y concretamente en las cualidades de "forma" y de distribución espacial que afectan al carácter funcional de la conectividad, mayoritariamente en condiciones de isotropía espacial (no dependiente de la dirección). Especialmente desde Australia pero también en el medio mediterráneo (Imeson y Prinsen, 2004; Bautista *et al.*, 2007), en el campo del manejo de ecosistemas desde la plena consideración de procesos hidrológicos, ha habido un desarrollo de metodologías de aproximación considerando condiciones anisotrópicas de dirección del flujo, basado en la dicotomía vegetado/desnudo. Desde una aproximación más cualitativa, el

tamaño de grano de los patrones se reconoce como un aspecto también fundamental en la conectividad funcional de la escorrentía (Lavee *et al.*, 1998; Puigdefábregas y Boer, 2005).

Asociado a la cuestión de análisis de la configuración a partir de los patrones de distribución espacial, es cada vez más frecuente el acceso y la disponibilidad de imágenes progresivamente de mayor resolución espacial, lo que permite una progresiva mejora en las metodologías de extracción de los patrones de vegetación/suelo-desnudo. Sin embargo, todavía las relaciones de escala vs. resolución están escasamente investigadas, siendo un campo todavía inexplorado desde la perspectiva concreta del funcionamiento hidro-geomorfológico, si bien es un frente abierto en la ecología del paisaje, especialmente en la manera en que la resolución o escala de observación afecta a la detección de la configuración, debido al fenómeno de mezcla en cada unidad de pixel.

1.3 JUSTIFICACIÓN Y MARCO DE TRABAJO DE LA PRESENTE TESIS

La **heterogeneidad espacial** es una de las características del ámbito mediterráneo, una de sus manifestaciones visibles puede ser lo que hemos definido anteriormente como los **componentes superficiales del suelo (CSS)**, los cuales tienen a su vez influencia en las propiedades subsuperficiales (Lavee *et al.*, 1998). Se une a estas características el funcionamiento por **umbrales de respuesta** en los procesos. Y, en nuestro caso, ambas propiedades de los sistemas van a condicionar su respuesta hidrológica; a través de lo que denominamos **conectividad**. Beven (2002) señala que para superar las dificultades que estos aspectos, heterogeneidad y conectividad, introducen en la modelización de la generación de escorrentía en zonas áridas, es necesario el desarrollo de nuevos modelos que manejen escalas de detalle en el estudio de los procesos y nuevos métodos que profundicen en la dinámica a escala de elementos de las laderas.

En la aproximación geomorfológica las propiedades de las formas son producto de la actividad de los procesos y, al mismo tiempo, estos configuran las formas. El estudio de los procesos en si tiene muchas limitaciones ligadas a la variabilidad espacial y temporal de los fenómenos responsables; pero el análisis de las formas, como la distribución espacial de los CSS, puede contribuir a esclarecer parte de las lagunas que las medidas y experimentación no resuelven. Se hecho en cuanto se ha desarrollado y extendido tecnología para la detección detallada de las formas (p.e. fotografía aérea a baja altitud y LiDAR) se han abierto al estudio de los procesos nuevos horizontes.

La **hipótesis de partida** de esta tesis plantea que los componentes superficiales del suelo (CSS) a escala de parche y de parcela (*patch scale* y *plot scale*, respectivamente), como propiedades de forma de las laderas, desempeñan un papel fundamental en los procesos geomórficos de generación de escorrentía y movilización de sedimento e influyen la respuesta hidro-geomorfológica de la **ladera**.

El estudio de los CSS en el espacio y como determinan el comportamiento hidro-geomorfológico a escalas de detalle (parche) y media (parcela) puede generar información susceptible de ser incorporada en la modelización hidrológica a escala de ladera ayudando a la detección de umbrales de conectividad.

Más allá del ámbito de esta hipótesis, los umbrales de conectividad hidrológica a escala de ladera pueden apoyar el avance del conocimiento en la respuesta general del sistema a escala de cuenca (Figura 1.14).

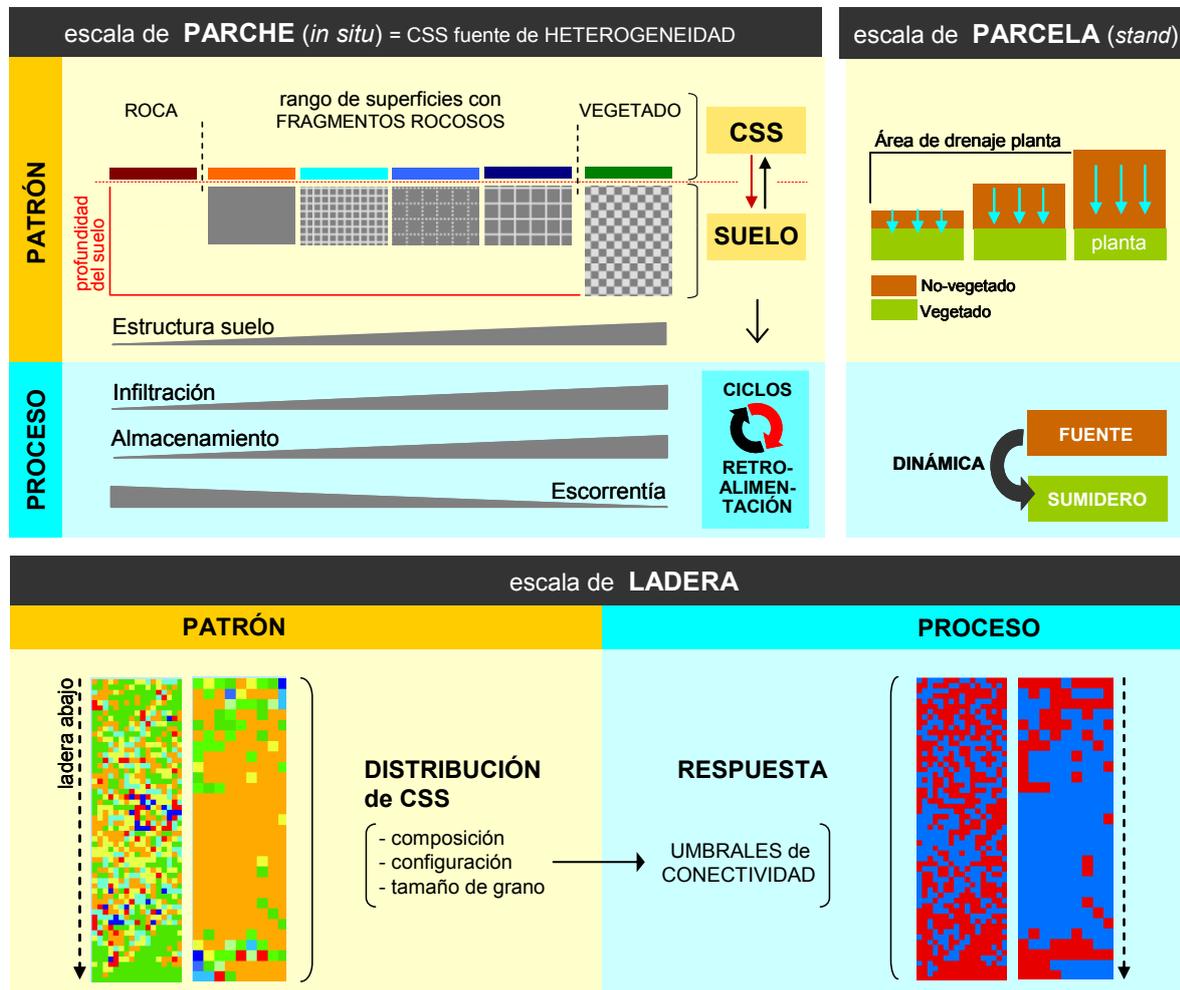


Figura 1.14. Diagrama conceptual que representa la hipótesis de partida. CSS: Componentes Superficiales del Suelo A: parches de suelo con distintos componentes superficiales y su influencia en algunas características del suelo (estructura, capacidad de infiltración, de almacenamiento de agua) y procesos (generación de escorrentía); B: distinto tamaño de áreas fuente y sumidero de agua y sedimentos a escala media; C: posibles patrones de conectividad hidrológica en función del patrón de componentes superficiales del suelo en la ladera.

El **objetivo General** de la tesis es definir la influencia de los componentes superficiales del suelo (CSS) en la respuesta hidro-geomorfológica de laderas mediterráneas, a diferentes escalas espaciales y temporales.

Tabla 1.1 Síntesis de la hipótesis y objetivos de la tesis. (CSS: componentes superficiales del suelo).

Hipótesis			
Los componentes superficiales del suelo a escala de parche y de parcela desempeñan un papel clave en los procesos geomórficos de generación de escorrentía y movilización de sedimento e influyen la respuesta hidro-geomorfológica a escala de ladera.			
Objetivo general			
Definir la influencia de los componentes superficiales del suelo (CSS) en la respuesta hidro-geomorfológica de laderas mediterráneas a diferentes escalas espaciales y temporales			
Objetivos específicos	Tareas principales	Escala espacial	Escala temporal
1. Analizar los patrones de CSS bajo diferentes condiciones climáticas. (Capítulo 4)	1.1. Desarrollo y aplicación de metodología para caracterización en campo los patrones de CSS 1.2. Análisis de los patrones de CSS a escala de parcela y ladera en las zonas de estudio	Parcela (detalle) Ladera (media)	Largo plazo (décadas)
2. Caracterizar la respuesta hidro-geomorfológica de los diferentes CSS a escala espacial y temporal de detalle en condiciones climáticas contrastadas. (Capítulo 5)	2.1. Parametrización de las características hidrológicas de los CSS basados en el desarrollo de un método de análisis para relacionar resultados de experimentos de lluvia y CSS 2.2. Discriminación entre efecto local y efecto de los CSS en la respuesta de la escorrentía a escala de parcela	Parche (detalle)	Corto plazo (eventos)
3. Estudiar la influencia de los patrones de CSS a escala intermedia (parcela) y a medio plazo en la respuesta hidro-geomorfológica. (Capítulo 6).	3.1. Colección y análisis de una base de datos de campo de respuesta hidro-geomorfológica de distintos patrones de CSS bajo condiciones de mínimas alteraciones (parcelas abiertas) 3.2. Definición de las interacciones entre los CSS y la respuesta hidro-geomorfológica en condiciones naturales y plazos medios de tiempo (varios años)	Parcela (media)	Medio plazo (años)
4. Investigar el funcionamiento hidrológico de la ladera considerando particularmente el efecto de los patrones de CSS. (Capítulo 7).	4.1. Desarrollo de un modelo que hidrológico a escala de ladera que incorpore el efecto estudiado en campo de los patrones de CSS 4.2. Caracterización de patrones de distribución de la escorrentía y conectividad del flujo superficial mediante la simulación de tormentas 4.3. Identificación de umbrales de conectividad hidrológica a escala de ladera.	Ladera (amplia)	Eventos (corto)

Este objetivo se desglosa en cuatro objetivos específicos:

1. Analizar los patrones de CSS bajo diferentes condiciones climáticas. (Capítulo 4)
2. Caracterizar la respuesta hidro-geomorfológica de los diferentes CSS a escala espacial y temporal de detalle en condiciones climáticas contrastadas. (Capítulo 5)
3. Estudiar la influencia de los patrones de CSS a escala intermedia (parcela) y su dinámica temporal en la respuesta hidro-geomorfológica. (Capítulo 6)
4. Investigar el funcionamiento hidrológico de la ladera considerando especialmente el efecto de los patrones de CSS. (Capítulo 7)



Figura 1.15 Síntesis del marco conceptual y metodológico de la presente tesis.

Para abordar estos objetivos se utilizan técnicas de experimentación en campo (simulaciones de lluvia) que proporcionan detalle espacial de los procesos en parcelas pequeñas y en tormentas simuladas y controladas. Todo ello se combina con el estudio a medio largo plazo de la respuesta hidrológica en condiciones de lluvia natural durante varios años en parcelas abiertas con mínimas alteraciones, que permiten estudiar la dinámica temporal de la respuesta hidro-geomorfológica. Y con el estudio en campo y técnicas de cartografía y análisis espacial para estudiar los patrones de componentes superficiales del suelo tanto en parcelas como en toda la ladera. Finalmente se desarrolla un modelo para simular la respuesta hidrológica de toda la ladera incluyendo los patrones de CSS estudiados en el campo, calibrado con datos propios, que permite simular la respuesta

hidrológica del conjunto de la ladera en condiciones controladas y analizar el papel de los componentes superficiales del suelo en la misma.

El **marco conceptual** de esta tesis se sintetiza en la Figura 1.15, y se apoya en:

1. La **Teoría General de Sistemas**, teniendo en cuenta las características de **estructura, auto-organización y transferencia** de materia y energía como claves que definen a un sistema.
2. Se adopta una estructura jerárquica anidada basada en la **Teoría Jerárquica** (O'Neill, 1986).

Desde una perspectiva hidro-geomorfológica, los diferentes niveles de escala analizados en esta tesis son el de parche, parcela y ladera, tal y como se ha mencionado en los objetivos.

La **aproximación metodológica** de la tesis es el estudio del **proceso-patrón** (Figura 1.15), en la que los procesos llegan a inferirse a partir de la interpretación de las formas. En términos sistémicos, (i) las formas o patrones son el resultado de la auto-organización de los elementos del sistema, a partir de la cual existe una emergencia de nuevas propiedades desde niveles inferiores, siempre en un contexto de restricciones impuestas por los niveles superiores; mientras que (ii) los procesos se asimilan al modo en que se produce la transferencia de materia y energía entre los diferentes niveles. En nuestro caso, el patrón corresponde al modo en que la composición de CSS de niveles inferiores se ha auto-organizado en el nivel ladera. El proceso a esta escala se identifica con los umbrales a partir de los cuales se produce la conectividad de escorrentía y sedimentos, esto es, se produce la transferencia de flujo superficial de la escala de parcela a la de ladera.

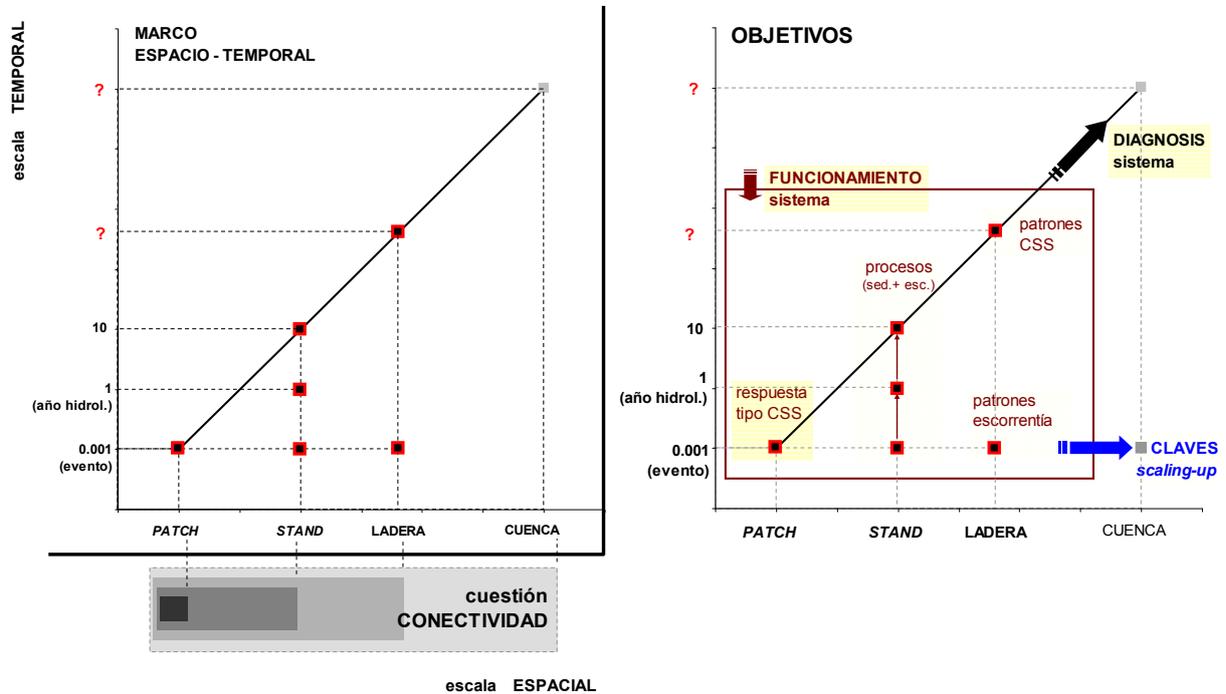


Figura 1.16 Datos disponibles (Izda.) y estructura de la tesis (Dcha.) proyectados en la escala espacial y temporal según la teoría de organización jerárquica anidada (Holling, 1992).

A medida que se incrementa la escala espacial, los tiempos de reacción del sistema también se incrementan, ambas en progresión logarítmica, según la hipótesis de organización jerárquica anidada del sistema, en el que cada nivel tiene su propio rango de escalas tanto en el espacio como en el tiempo (Holling, 1992). Así pues, de manera aproximada, los puntos sobre la recta (Figura 1.16) representan el nivel de escala con disponibilidad de datos en esta tesis y cómo se estructuran los capítulos de la misma.

CAPÍTULO 2

ÁREAS DE ESTUDIO: DINÁMICA DE PROCESOS EN EL GRADIENTE DE SUBAMBIENTES

Las laderas estudiadas se encuentran en la provincia de Alicante, dentro del extremo oriental de las estribaciones del Prebético externo peninsular (Figura 2.1), en dos áreas con fuerte contraste en las condiciones climáticas debido a las diferencias de altitud (800 m aprox.) y disposición de los relieves. Al mismo tiempo son áreas con una historia diferente en cuanto a usos del suelo. Ambas localidades corresponden a los dos extremos del gradiente climático estudiado previamente por Boix-Fayos (2000), cuyo objetivo era establecer diferentes escenarios de respuesta a diferentes condiciones climáticas manteniendo el resto de factores lo más homogéneos posibles y representativos de las condiciones ambientales mediterráneas.

Se aprovecha el gradiente altitudinal existente entre ambas áreas de estudio, donde las condiciones climáticas varían gradualmente aumentando las precipitaciones y disminuyendo las temperaturas a medida que ascendemos en altitud, mientras que se mantiene semejante la litología.

En resumen, los criterios de selección de estas zonas de estudio fueron: (i) la necesidad de escoger un área que representara una situación típica de montaña mediterránea tanto en el sustrato rocoso, como en variedad climática, procesos geomorfológicos actuales y pasados, intervención humana y estado de degradación; (ii) el hecho de que todas ellas se encontraran en estado seminatural, con escasa o nula intervención antrópica actual y (iii) la existencia en la zona de un gradiente climático. Así, ambas áreas presentan una homogeneidad litológica con tipos similares de calizas, dentro de un rango de pendientes y propiedades morfológicas comparables. Se localizan también en un territorio con una larga historia de usos del suelo y de intervención antrópica al menos desde la prehistoria. En la actualidad los suelos de las dos áreas de estudio están clasificados como de uso forestal, pero existen datos sobre sus usos anteriores y los principales impactos antrópicos que han sufrido.

Las dos áreas de estudio representan el contraste climático entre el mediterráneo subhúmedo de Cocoll (CC), y el semiárido de Benidorm (BE). Además de la variable puramente climática se incorpora para el área de BE el factor exposición de la ladera (sur vs. norte), considerando así el contraste micro-ambiental introducido por las variaciones de insolación (Figura 2.2). *A priori*, y siguiendo el esquema de la hipótesis de distribución del patrón de vegetación según Lavee *et al.* (1998), se asume una progresiva reducción de la cobertura y el tamaño de los parches de vegetación a medida que se

aridifican las condiciones a lo largo del gradiente propuesto como adaptación a las disponibilidades hídricas, lo cual servirá para valorar en relativo el estado de degradación de cada área de estudio.

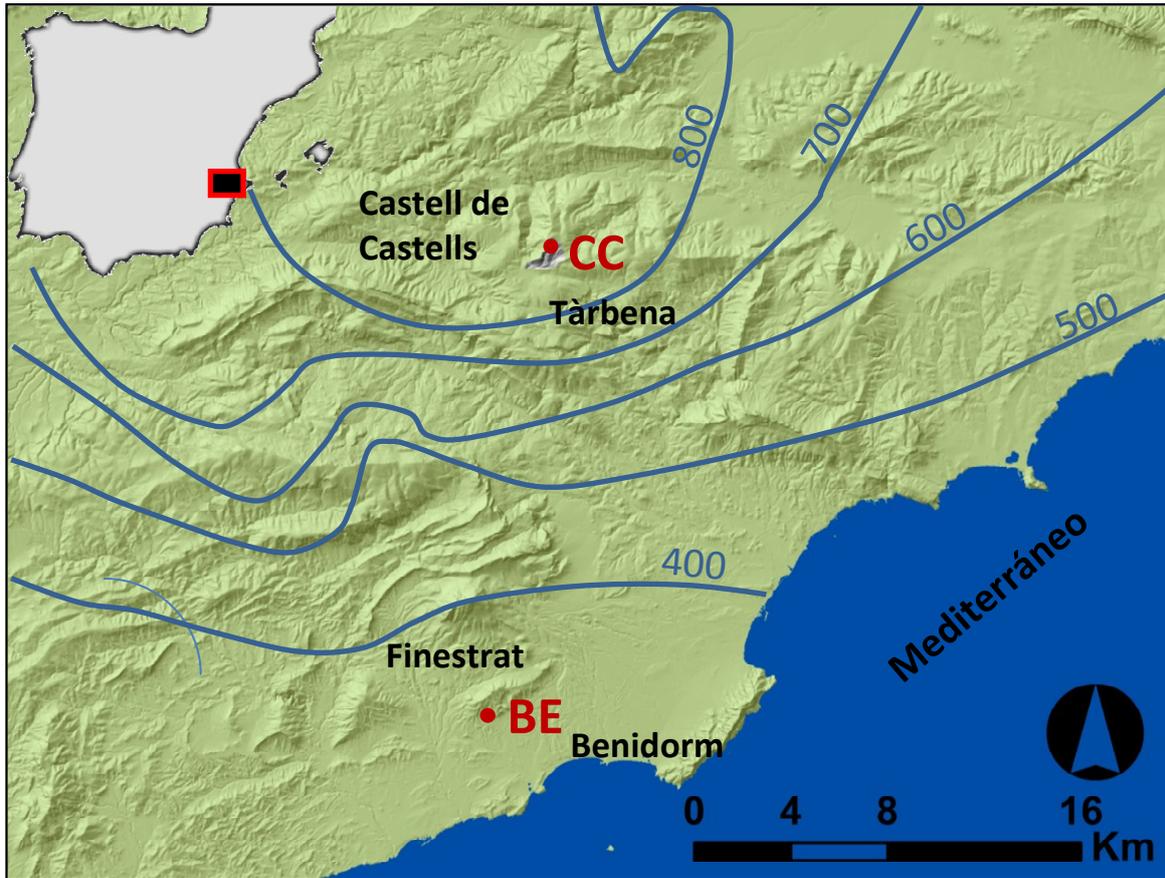


Figura 2.1. Mapa de situación general de las áreas de estudio de Cocoll (CC) y Benidorm (BE) e isoyetas de precipitación media anual (mm).

En la tabla 2.1 se resumen las **características** principales de las **laderas seleccionadas** en cada una de las zonas de estudio. La **denominación** se debe en el área de estudio correspondiente al semi-árido con el nombre de la localidad más cercana a ella, Benidorm (BE) (Figura 2.1), y en el caso de la zona más alta con el nombre del macizo montañoso dónde se ubica, Cocoll (CC). Además a lo largo de todo este trabajo denominaremos cada ladera, seleccionada en cada una de las zonas de estudio, Norte (N) o Sur (S), con el objeto de simplificar nomenclaturas, aunque su orientación no sea estrictamente Norte o Sur, sino aproximada tal y cómo se detalla en la tabla 2.1.

Tabla 2.1. Características generales de las zonas de estudio

Área de estudio	Ladera	Exposición (ºE)	Altitud m.s.n.m	Pendiente media (º)
Benidorm (BE)	Sur	210	74-106	22
	Norte	75	74-90	18
Cocoll (CC)	Sur	120	850-910	18

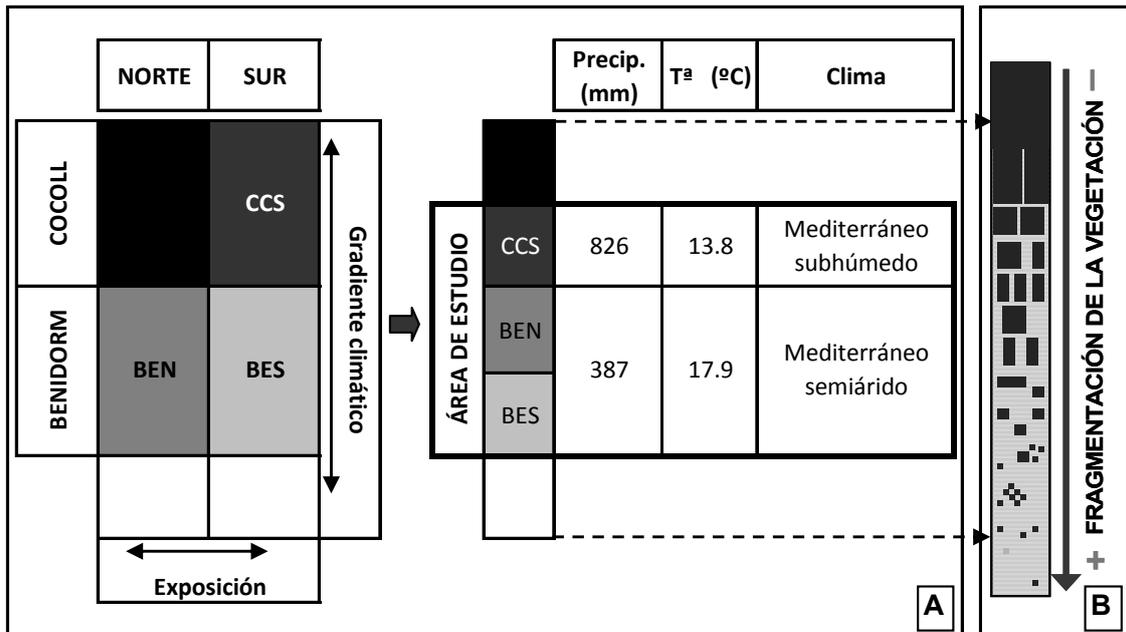


Figura 2.2 Posición de cada ladera de estudio en el gradiente climático propuesto (a) y su correspondencia con la hipótesis de cambio de los patrones de distribución de vegetación y suelo desnudo a lo largo de éste (b). (CCS: Cocoll sur; BEN: Benidorm norte; BES: Benidorm sur).

Ambas áreas de estudio han sido objeto de estudios previos en el ámbito de los procesos de erosión y degradación de los suelos y de la cobertura vegetal desarrollados en el marco de diferentes proyectos de investigación financiados por la Unión Europea, el Estado Español y la Comunidad Valenciana. Así mismo, las dos áreas de estudio han formado parte de la Red de Estaciones Experimentales de Seguimiento y Evaluación de la Erosión y la Desertificación (RESEL).

2.1. CONTEXTO GEOLÓGICO Y GEOMORFOLÓGICO

La zona de estudio que denominamos Benidorm (BE) se localiza 20 Km al sur de Cocoll (Figura 2.1; coordenadas UTM 30N 745200 4270900) en una posición mucho más cercana a la costa y con una altitud en torno a los 100 m. El área de estudio pertenece a la cuenca del Barranc de la Cala (término municipal de Finestrat), de dirección NO-SE. Es uno de los cauces subparalelos que drenan la Serra Cortina (530 m) -una estribación meridional del macizo del Puig Campana (1410 m)- disectando un conjunto de abanicos aluviales del Pleistoceno inferior-medio (Harvey, 1978). Geológicamente forma parte de la subunidad estructural denominada sinclinal de La Marina, se trata de un eje SO-NE que limita al Norte con la Serra de Bernia, al O con la Serra Cortina, al Este con la Serra Gelada y por el Sur se abre directamente hacia el mar (Rey Salgado *et al.*, 1993). La litología de las laderas estudiadas está formada por calizas del Cretácico superior (Cenoniense; IGME 1983) y el valle se halla recubierto de sedimentos cuaternarios en parte desmantelados por la erosión.

La ladera de exposición sur (BES), tiene una pendiente media de 22º ligeramente superior que la de la ladera norte con una media en torno a 18º (Tabla 2.1). En la figura 2.3 se representa un perfil transversal de la cuenca, en el se puede apreciar que tanto la ladera norte como la sur son bastante rectilíneas en su tramo central. Presentan una ligera convexidad en la cumbre y también una ligera convexidad en la base, típica de laderas que han estado afectadas por la incisión de un cauce en su

base (Calvo, 1987). Esta convexidad en la base, persiste a pesar del relleno por aterrazamiento del fondo del valle. Ello tiene dos implicaciones: por una parte nos dice que el aterrazamiento no se llevó a cabo en un valle relleno sino en uno incidido, y por otra parte que la convexidad basal ha sido acentuada por la propia técnica de cultivo, que zapa la base de las laderas para obtener más suelo hasta llegar al sustrato rocoso.

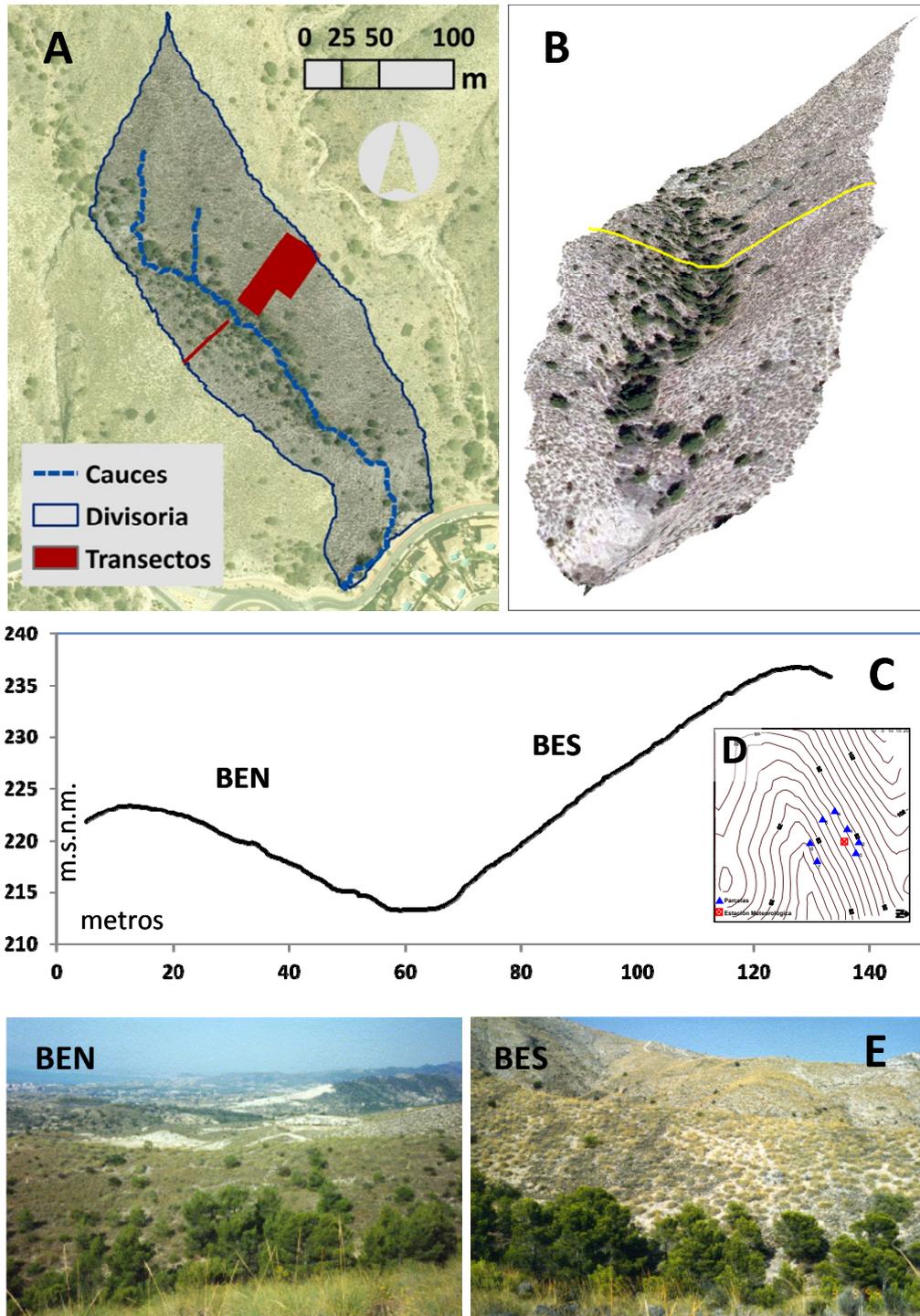


Figura 2.3 Cuenca de Benidorm (a); visión 3D (b); perfil longitudinal de la cuenca (c); situación de las parcelas y estación meteorológica en el transecto (d) y vistas generales de las dos laderas (e).

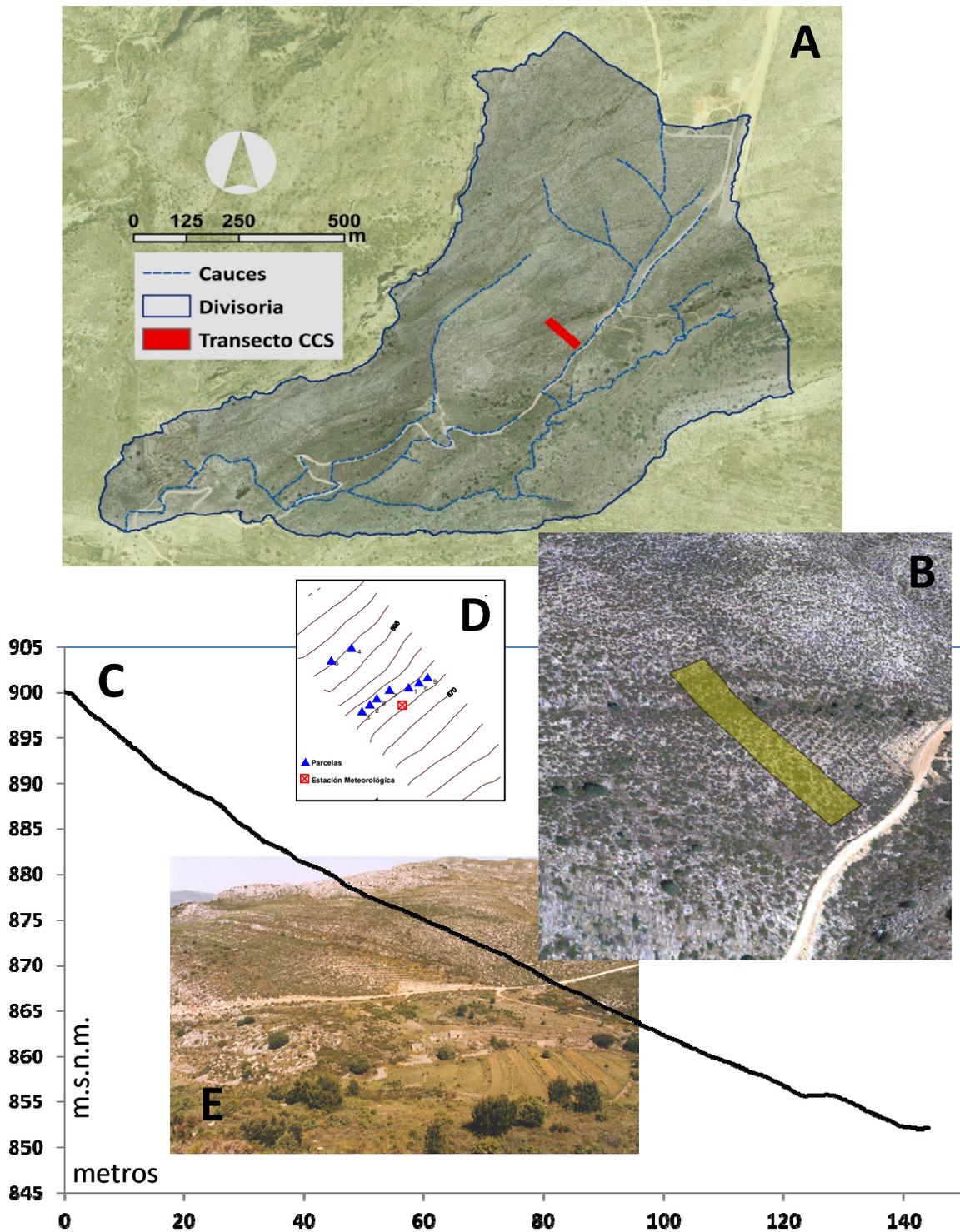


Figura 2.4. Cuenca de Cocoll (CC) (a); visión 3D con situación del transecto CCS (b); perfil longitudinal de la ladera sur (En el transecto CCS) (c); situación de las parcelas y estación meteorológica (d) y vista general de la ladera (e).

El fondo del valle, cuyas terrazas de cultivo están actualmente abandonadas, aparece como una continua área convergente en el plano transversal y con una fuerte disminución de pendientes que pasan desde los 26º en algunos puntos de la ladera Sur y Norte a casi 0º en las partes aterrazadas del fondo.

Cocoll (CC) ocupa la posición (Figura 2.1) más septentrional (coordenadas UTM 30N 747500 4291250), y con sus 900 m de altitud, en la más elevada. La cuenca presenta una forma alargada NE-SW y vierte sus aguas al Pla de Dalt, una zona semi-endorreica que se comunica con el Riu Xaló a través del Barranc de Dalt. La litología dominante son calizas Senonienses del Cretácico superior, con algunos afloramientos de materiales limosos intercalados en la parte más oriental de la vertiente norte de la cuenca. La cuenca de estudio forma parte de un gran macizo calcáreo coronado por el pico Cocoll (1041 m) que conecta hacia el Este con las sierras del Penyó, del Carrascal de Parcent, del Castell de la Solana y finalmente la Serra del Montgó, ya a orillas del mediterráneo. Los procesos geomórficos más destacables son aquellos relacionados con la disolución kárstica a causa de las elevadas precipitaciones y la litología dominante.

El esquema geomorfológico del área de estudio de Cocoll (Boix-Fayos, 2000) se caracteriza por la presencia de un gran macizo calcáreo (La Llacuna, L'Encaina y el Tossal dels Mosquits) coronado por el monte Cocoll (1041 m). Constituye el flanco Norte del valle mioceno que se extiende desde Tárben a Castell de Castells y limita al Sur con la Serra d'Aixorta. Es un paisaje dominado por laderas calcáreas con escarpes, cantiles, canchales y cauces encajados.

La morfología de la ladera de la vertiente sur (CCS, Figura 2.4) se caracteriza por una muy larga convexidad de amplio radio en la cumbre, una parte central casi rectilínea con alguna ruptura de pendiente causada por afloramientos rocosos y un tramo cóncavo en la base característico de laderas regularizadas, que si la prolongásemos hasta el talweg mostraría una amplia concavidad, aunque desdibujada por los aterrazamientos existentes allí. La ladera sur seleccionada (CCS) se encuentra en la zona media alta de la cuenca (Figura 2.4), con una pendiente media de 18º (Tabla 2.1).

Tabla 2.2 Índices climáticos asimilados en las zonas de estudio.

	Indice global	Tipo climático	Indice de Aridez de Martonne	Déficit hídrico de Gaussen	Indice de continentalidad de Gorczynsky
Benidorm (BE)	-39.9	DB'3da' Clima semiárido mesotérmico, poco a nada de superávit en el invierno	10.8	5.5	18.2
Cocoll (CC)	5.4	C2B'3s2a' Clima subhúmedo húmedo, mesotérmico con déficit importante en el verano	29.3	14.8	20.8

Fuente: Pérez-Cueva (1994)

2.2. CARACTERÍSTICAS CLIMÁTICAS GENERALES

Para el caso de Benidorm (BE) la caracterización climática está elaborada a partir de los datos de los observatorios de Rellu y Alicante (El Altet). El tipo de clima es el Mediterráneo Mesotérmico Semiárido con poco o nada de superávit hídrico en invierno (DB'3da') (Tabla 2.2). La media de precipitaciones anual es de 387.7 mm con escasa frecuencia de tormentas (Tabla 2.3). La media anual de temperatura es de 17.9 °C, aunque hay que destacar que tiene una amplitud térmica superior a la de Cocoll. Otros índices climáticos quedan recogidos en las tablas 2.2 y 2.3.

Tabla 2.3 Datos generales de precipitación y temperatura asimilados a las zonas de estudio.

	Pp (mm)	Nº días de precipitación	Tormentas anuales (días)	Tª media (°C)	Tª media de las máximas (°C)	Tª media de las mínimas (°C)
Benidorm (BE)	387.7	28.2	0.2	17.9	23.1	12.7
Cocoll (CC)	826.3	52.5	2.7	13.8	17.2	10.4

Fuente: Pérez-Cueva (1994)

La caracterización climática de la zona de Cocoll (CC) se ha elaborado en base a las estaciones meteorológicas más cercanas (Tàrbena, Alcoletja y Fontilles). El clima es Mediterráneo Mesotérmico Subhúmedo-Húmedo con déficit importante en verano (C2B'3s2a') (Tabla 2.2). Tiene una media de precipitaciones de 826.3 mm año⁻¹ y una media de temperatura de 13.8 °C (Tabla 2.3). El alto valor de precipitaciones se debe a que Cocoll está dentro de una de las áreas de mayor pluviosidad del territorio valenciano debido a factores de naturaleza orográfica y de orientación de la costa y los relieves en la que son frecuentes la formación de tormentas convectivas estivales.

2.3. VEGETACIÓN: DESCRIPCIÓN BIOGEOGRÁFICA

Desde el punto de vista corológico o biogeográfico el área de estudio de Cocoll queda dentro de la Región Mediterránea, en la Superprovincia Mediterráneo- Iberolevantina, provincia valenciano-catalano-provenzal-balear, en el sector setabense. Sin embargo, el área de estudio ubicada más al Sur y de clima semiárido (Benidorm) se encuentra en la zona de la provincia Murciano-Almeriense (Costa, 1986). La tabla 2.4 muestra las series de vegetación climax que corresponde a cada una de las laderas de estudio y la vegetación actual que presentan.

La localidad de estudio más baja, Benidorm (BE), queda enmarcada dentro del piso de vegetación Termomediterráneo inferior con ombroclima semiárido. Se sitúa en el límite Norte de la provincia murciano-almeriense y la vegetación climax corresponde a la asociación *Chameropo-Rhamnetum lycioides* con *Pistacia lentiscus* constituye la vegetación climax (Rivas Martínez, 1985). Esta vegetación se encuentra en la actualidad degradada a un espartal en la ladera Sur (BES) y a un romeral-espartal en la ladera Norte (BEN) (Tabla 2.4). En la ladera Sur está presente la alianza *Stipion-tenacissima* con *Stipa tenacissima*, *Anthyllis cytisoides*, *Thymus vulgaris*, *Lygeum spartum*, *Globularia alypum* y *Brachypodium retusum* (Boix-Fayos, 2000). En el fondo del barranco de la

cuenca de Benidorm y en la ladera norte aparecen *Pinus halepensis* y vegetación más típica de romeral. Así en la ladera Norte además de estar presentes algunos ejemplares de *Stipa tenacissima*, sobre todo en la parte alta de la ladera, tiene lugar una variedad florística más típica de romeral (alianza *Rosmarino-Ericion*). Aparece un ejemplar de *Pistacia lentiscus* bien desarrollado y además *Erica multiflora*, *Rosmarinus officinalis*, *Rhamnus oleoides*, *Ulex parviflorus*, *Anthyllis cytisoides*, *Thymelaea hirsuta*, *Ephedra major*, *Teucrium polium* y *Globularia alypum* (Boix-Fayos, 2000).

Tabla 2.4 Series climax y actuales de vegetación en las laderas de estudio.

	Vegetación climax	Vegetación actual
Benidorm Sur (BES)	<i>Chamaeropo-Rhamnetum lycioides</i>	<i>Stipion tenacissima</i> (espartal)
Benidorm Norte (BEN)	<i>Chamaeropo-Rhamnetum lycioides</i>	<i>Stipion tenacissima/Rosmarino-Ericion</i> (espartal-romeral)
Cocoll Sur (CCS)	<i>Rubio longifoliae-Quercetum rotundifoliae</i> (carrascal levantino sobre calizas)	<i>Rosmarino-Ericion</i> (romeral con brezos)

Fuente: Costa (1986), en Boix Fayos (2000).

Cocoll (CC) esta enmarcada dentro del piso de vegetación Mesomediterráneo medio con un índice de termicidad de 332, termoclima mesomediterráneo y ombroclima subhúmedo. Potencialmente le correspondería una vegetación arbolada y esclerófila, un carrascal (*Quercus ilex rotundifolia*). Su serie de vegetación potencial sería *Rubio longifoliae- Querceto rotundifoliae sigmetum*= Serie termomesomediterránea iberolevantina basófila de la carrasca) (Rivas Martínez, 1985). Sin embargo debido al pastoreo en el pasado y a los incendios forestales continuos la vegetación actual se encuentra en la tercera etapa de degradación apareciendo en la ladera Sur un romeral y en la ladera Norte un salviar. En la ladera Sur es un romeral con brezos, alianza *Rosmarino-Ericion*, estando presentes las siguientes especies: *Rosmarinus officinalis*, *Juniperus oxycedrus*, *Ulex parviflorus*, *Erica multiflora*, *Thymus vulgaris*, *Santolina chamaecyparissus*, *Cistus albidus*, *Sedum sediforme* y *Brachypodium retusum*. (Boix-Fayos, 2000; Pérez Badía, 2001)

2.4. SUELOS: CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y QUÍMICAS DE LOS SUELOS

Todos los perfiles de suelo de Benidorm (BE) se han clasificado como Leptosoles líticos (Soriano, *et al.*, 1996; Tabla 2.5). Son suelos poco desarrollados que no sobrepasan en la mayoría de las ocasiones los 10 cm de profundidad, aunque ésta suele aumentar progresivamente desde la parte alta hacia la parte baja de las laderas. Son suelos de textura franco-limosa con alto contenido en carbonatos (entre 25.90 y 51.80 %) que, a pesar de su escasa profundidad, muestran a simple vista una estructura bien desarrollada, propiciada por la gran actividad biológica de lombrices de tierra, una elevada proporción de los agregados que la componen son corrícolas de anélidos. Las principales características físicas y químicas de estos suelos se recogen en las figuras 2.6 y 2.7.

Tabla 2.5 Suelos clasificados en las distintas partes de las laderas de estudio (LPq: Leptosol lítico, CLh: Calcisol háplico, RGc: Regosol calcáreo, LVx: Luvisol crómico). En Soriano *et al.* (1996)

Parte de la ladera	BES	BEN	CCS
Alta	LPq	LPq	LPq
Media	LPq	LPq	LVx / CLh
Baja	LPq	LPq	RGc



Figura 2.5 Perfiles de suelo, estudiados por Soriano *et al.* (1996), representativos de las dos laderas de estudio en sus dos orientaciones norte y sur. A: BEN y BES; B: CCN y CCS.

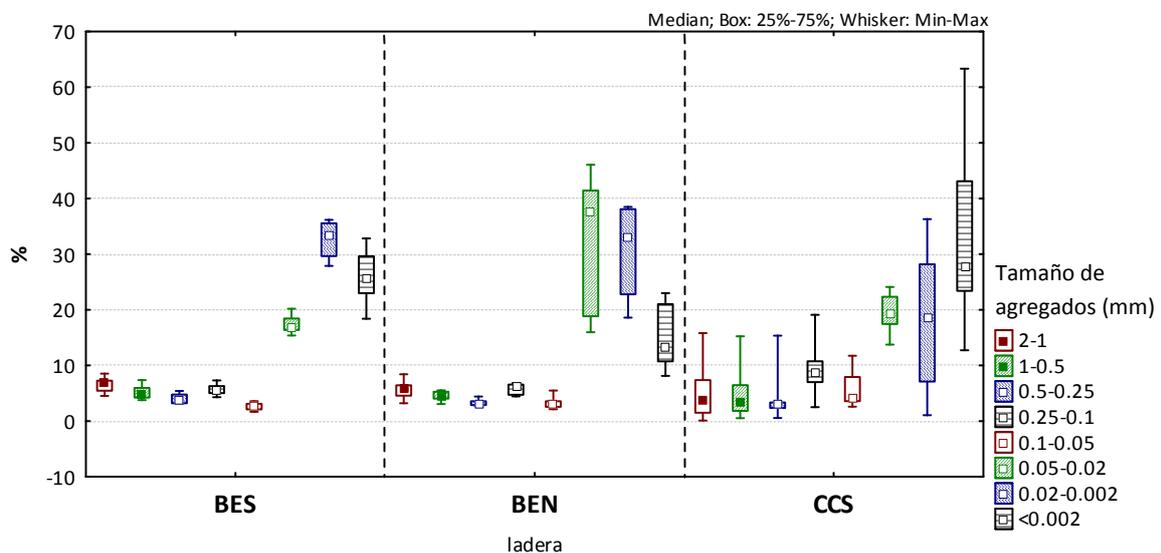


Figura 2.6 Distribución del tamaño de agregados en los perfiles de suelo analizados en Boix-Fayos (2000) en las tres laderas de estudio.

Los suelos en Cocoll (CC) son principalmente Leptosoles líticos y Luvisoles crómicos (Soriano *et al.*, 1996) con textura franca o franco-arcillosa. La estabilidad de agregados del suelo se muestra dependiente de la materia orgánica, contenido en arcilla y carbonato cálcico. Se han observado interesantes relaciones entre la estructura y la hidrología del suelo que sugieren que los tamaños

pequeños de agregados en el área de Cocoll facilitan la infiltración del agua (Boix-Fayos, *et al.*, 1998; 2001).

Bajo estas mismas condiciones ambientales otras áreas mediterráneas poseen un buen desarrollo de cobertura forestal y espesor en los perfiles de suelo. Aquí han predominado unos usos de suelo con un fuerte impacto en la vegetación y el suelo originarios, principalmente pastoreo y remoción de la vegetación en época pasada e incendios forestales en las últimas décadas (ver Boix-Fayos, 1999; Ramos *et al.*, 2001).

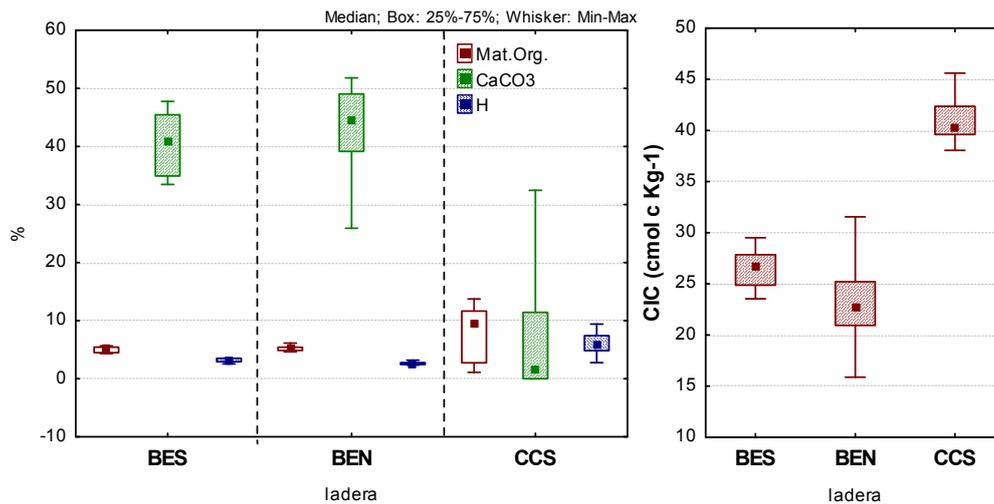


Figura 2.7 Propiedades químicas de los perfiles de suelo analizados en Boix-Fayos (2000) en las tres laderas de estudio.

2.5. USOS DEL SUELO

En Benidorm (BE) el uso actual es forestal. En el fondo del valle todavía existen numerosos aterrazamientos abandonados y en proceso de destrucción. El valle se dedicó, al menos en su etapa final, al cultivo del algarrobo. La ladera BES no muestra signos de haber sido cultivada pero si la BEN donde son apreciables restos derrumbados de alguna terraza. Las últimas terrazas cultivadas en el fondo del valle fueron abandonadas en 1975 (Boix-Fayos, 2000). Las laderas también han sido utilizadas para pastoreo en el pasado, y no sufre incendios forestales desde hace al menos 40 años.

En la cuenca de Cocoll el principal factor de degradación de la cubierta vegetal y suelos en tiempos recientes han sido los incendios forestales, no obstante tenemos constancia de que la ladera monitorizada, de exposición sur, no ha sufrido ningún incendio al menos en los últimos 25 años. Existen evidencias de una cierta actividad de pastoreo en la cuenca, a pesar de que esta reviste poca importancia en la comarca. En el fondo de valle aparecen numerosas terrazas de cultivo, abandonadas desde hace al menos 45 años (Corell, 1998). En total la superficie abancalada supone el 16% del total de la cuenca. En la ladera Sur no ha habido aterrazamientos.

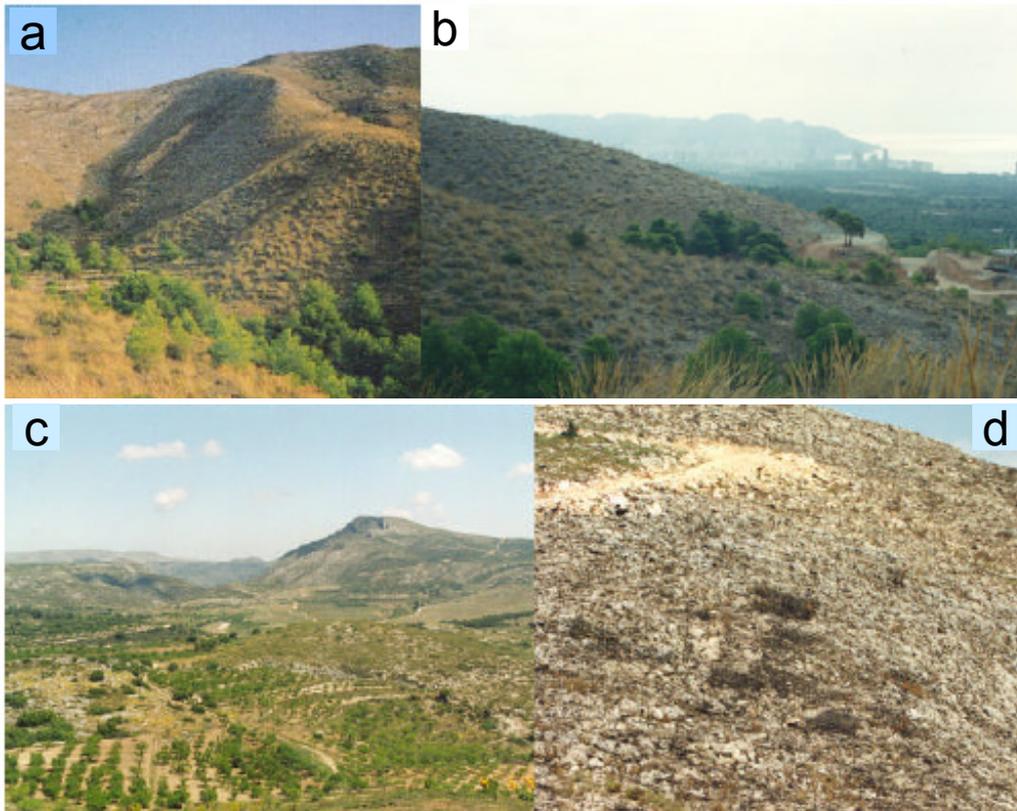


Figura 2.8 Vistas relativas a los usos del suelo en las zonas aledañas a las laderas de estudio. a) Aterrazamientos abandonados en la cuenca de Benidorm. b) Usos turísticos en la costa y al pie de la cuenca de estudio. c) Cultivos de secano en el Pla de Dalt, al pie de la cuenca de Cocoll. d) Incendio de matorral junto a la ladera de Cocoll Norte.

CAPÍTULO 3

METODOLOGÍA

El tema de esta tesis, estudio de los patrones de componentes superficiales y su influencia en la generación de escorrentía en ámbito mediterráneo, se aborda metodológicamente a través de una combinación de estudios de campo (experimentación y observación) y su transformación en un modelo digital de generación de escorrentía desarrollado (simulación) apoyado por las observaciones de campo (Figura 3.0.1-lzq.).

El ámbito de aplicación de la metodología son dos situaciones contrastadas de clima mediterráneo siguiendo el esquema de gradiente propuesto en Lavee *et al.* (1998). Corresponden a dos casos típicos de patrón discontinuo de vegetación en el entorno mediterráneo, el primero, área de Benidorm (BE), en el extremo semi-árido dónde la dispersión de la vegetación es un rasgo característico por las limitaciones hídricas de su régimen pluviométrico. Y el área de Cocoll (CC) que representa a un régimen sub-húmedo, que en situaciones de no-degradación mostraría un tapiz continuo de suelo y vegetación, pero que actualmente muestra un patrón de vegetación discontinuo por el uso intensivo del suelo históricamente, y que es la degradación típica de muchas zonas del mediterráneo.

Se asume la influencia de los **componentes superficiales del suelo (CSS)** como un factor fundamental en el control de la respuesta hidrológica superficial y erosiva. A partir de esta premisa se configura la metodología general en la que se analiza la distribución espacial de los CSS y su influencia sobre la respuesta hidrológica de las laderas. Además de analizarse su comportamiento individual (*hydrological response unit*, Kirkby *et al.*, 2002), se estudia su integración espacial en el continuo ladera.

La **aproximación proceso-patrón** es el instrumento metodológico con el que se analiza la interrelación entre el funcionamiento del sistema y su estructura, dada la evidente interdependencia entre ambos, especialmente en el campo de la geomorfología.

Se aborda además desde una perspectiva de salto de escala (*upscaling*), que se sustenta en la aproximación **sistémica de jerarquía de escalas anidadas** (O'Neill, 1986; deBoer, 1992; Cammeraat, 2004), donde el análisis de los niveles superiores se soporta sobre el conocimiento adquirido en los niveles de escala de más detalle inmediatamente inferiores. Un aspecto clave en este procedimiento es la detección de los procesos y factores que determinan la emergencia de estructuras en los niveles superiores.

La visión **multi-escala** adoptada considera tres niveles de análisis de **micro-parcela, parcela y ladera** (Figura 3.0.1-Izda.). Con cada paso de nivel se incrementa la complejidad en términos de heterogeneidad potencial, así como de emergencia de nuevos factores de control (p.e. posición en el transecto de ladera y topografía).

El análisis de la respuesta hidrológica se realiza a la escala de micro-parcela, parcela y ladera. Complementándose además con movilización de sedimentos en la escala de parcela. A escala de ladera el interés se centra en dos aspectos: (i) el análisis de los patrones de distribución de componentes superficiales del suelo (CSS) y (ii) la dinámica en la conectividad de la escorrentía superficial. En la secuencia de trabajo (Figura 3.0.1), los resultados obtenidos en cada nivel alimentan los estadios posteriores de análisis.

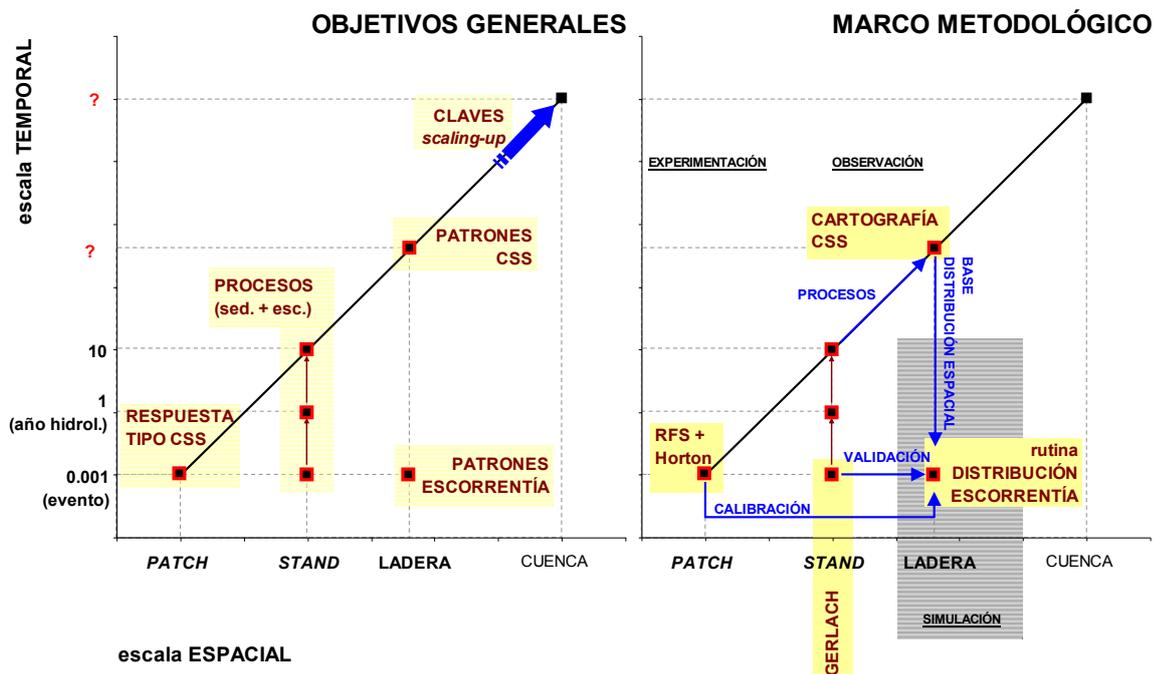


Figura 3.0.1 Estructura general del marco metodológico (Dcha.) en relación a los objetivos generales (Izda.) desglosados en las diferentes escalas espacio-temporales, partiendo de la figura 1.16 del capítulo de Introducción.

De este modo (Figura 3.0.1):

1. La respuesta hidrológica a escala de microparcela con caracterización de los CSS se estudia con el análisis de una amplia base de datos procedentes de experimentos de lluvia simulada realizados en el campo, es la fase que llamamos de experimentación.
2. El estudio de la hidrología y producción de sedimentos de partes de la ladera se estudia mediante la observación en campo de escorrentía y sedimentos durante x años utilizando parcelas abiertas tipo Gerlach, cuya descripción aparece especificada en la sección 6.
3. Corresponde también a la fase de observación la cartografía detallada de campo de los CSS a escala de ladera.
4. Y el funcionamiento hidrológico del conjunto de la ladera se estudia desarrollando un modelo de distribución de la escorrentía a esta escala calibrado con los datos de campo, corresponde a la etapa de simulación.

3.1. PATRONES DE DISTRIBUCIÓN DE COMPONENTES SUPERFICIALES DEL SUELO (CSS).

La manera en que los *componentes superficiales del suelo* se distribuyen en el espacio constituye un testigo de los procesos e interacciones derivados de la acción de los agentes geomorfológicos que operan en un ambiente determinado. Bajo esta aproximación de *proceso-patrón*, y con el objeto de analizar la distribución espacial de los CSS relevantes en los procesos hidrológicos, se precisa partir de una metodología que permita con la precisión y calidad suficiente realizar una cartografía detallada de estos componentes en cada área de ladera seleccionada.

El esqueleto metodológico del estudio de los patrones de CSS se resume en tres etapas bien diferenciadas (Figura 3.1.1): (i) la obtención de un foto-mosaico adecuado para los objetivos propuestos; (ii) la cartografía pormenorizada de los CSS a lo largo del transecto de ladera mediante fotointerpretación y (iii) el análisis de patrones de distribución de CSS en base a esta cartografía.

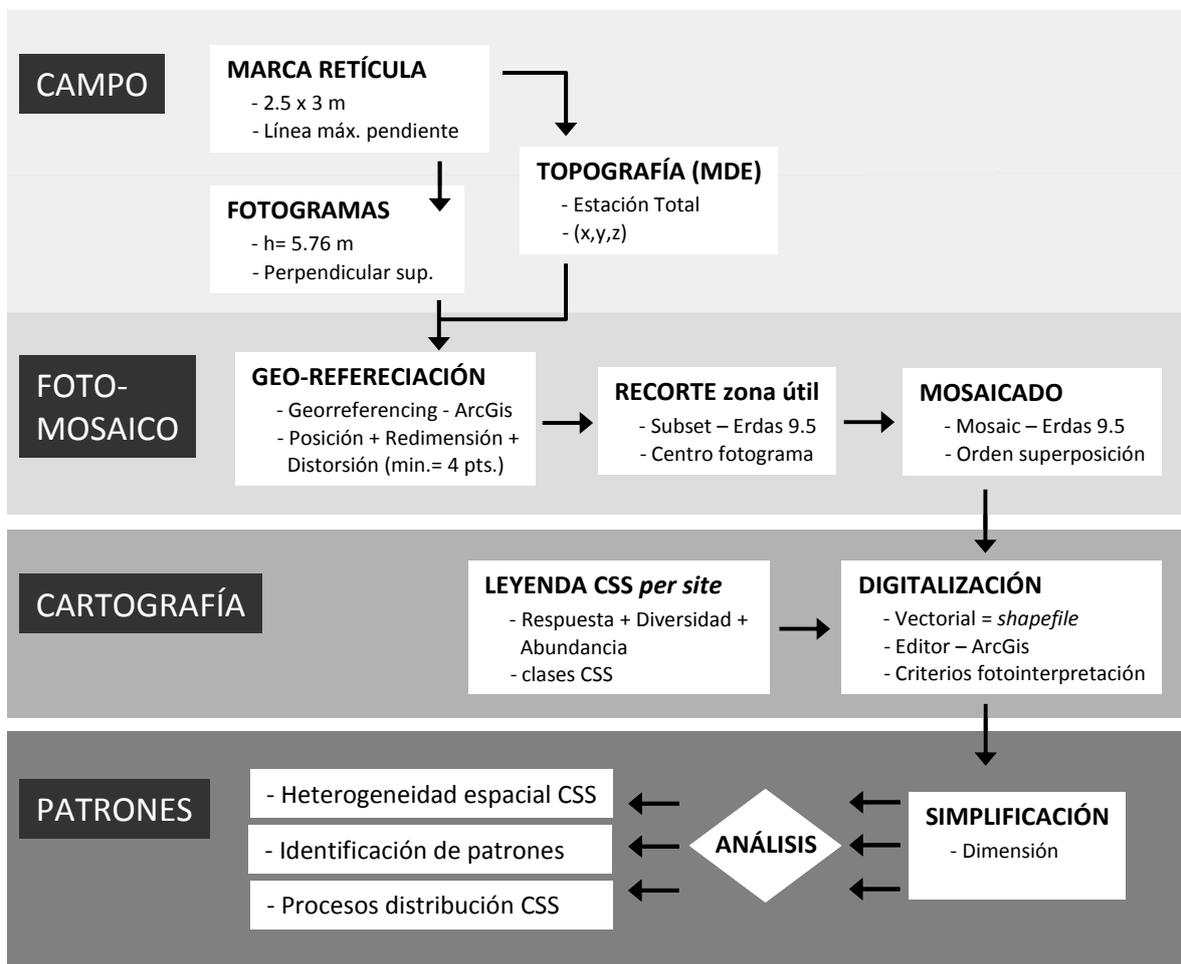


Figura 3.1.1 Metodología general de obtención y análisis de los patrones de distribución de los componentes superficiales del suelo (CSS).

3.1.1. Adquisición de imágenes y construcción del foto-mosaico

La imagen para la cartografía necesita de una resolución milimétrica para la identificación de CSS, además de una fiel reconstrucción espacial respecto de la verdad terreno. En este sentido, los métodos clásicos de captura de imágenes del terreno como la fotografía aérea (resolución deficiente) y los métodos de muestreo por cuadrículas (utilizados fundamentalmente en el muestreo de coberturas vegetales), resultan claramente insuficientes. Por ello ha sido necesario optar por la elaboración de una metodología para la generación de un foto-mosaico propio, construido a partir de fotogramas en el campo con una resolución en torno a 3 mm por píxel.

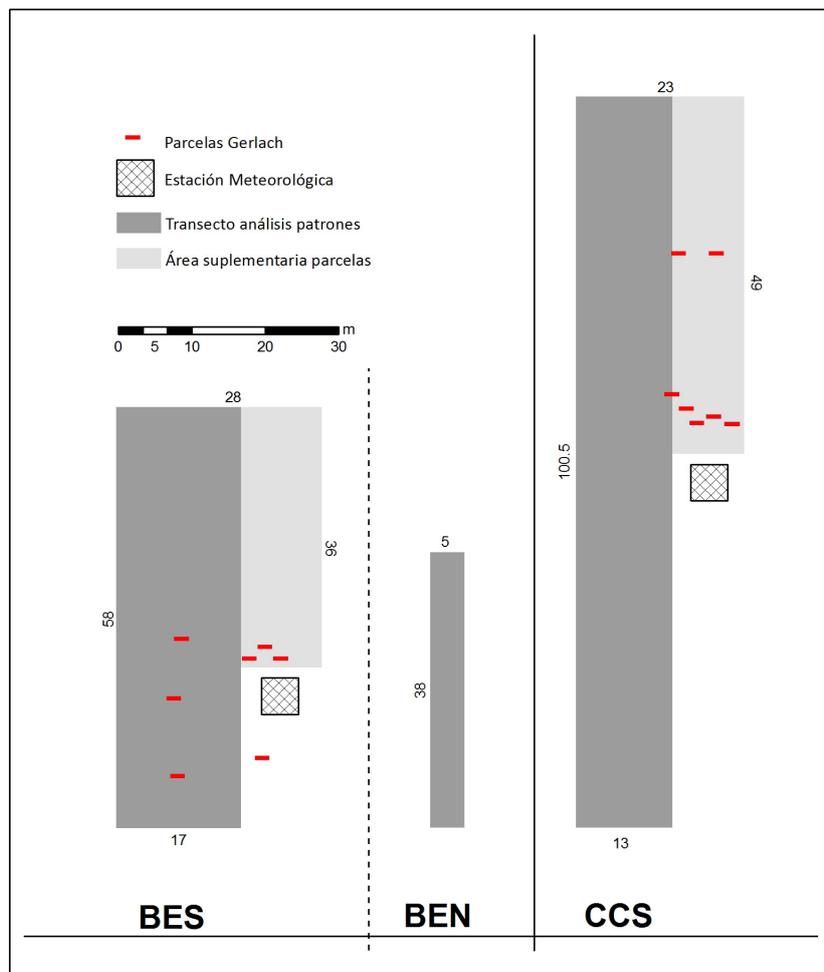


Figura 3.1.2 Características de las diferentes áreas de muestreo de los transectos.

Las áreas de los transectos se muestran en la Figura 3.1.2, observándose una disparidad en los tamaños y configuraciones de las zonas de muestreo según la ladera. Mientras que la longitud depende de la propia de cada ladera, la anchura viene determinada por otros factores. Aunque en el caso particular de CCS el transecto acaba en el camino que disecta la ladera. Las laderas de BES y CCS tienen una anchura equiparable, si bien la banda más estrecha es la de Benidorm Norte (BEN) por corresponder a un momento diferente de muestreo con otros objetivos, pero que se decidió no

ampliar por representar suficientemente el carácter general de la ladera. Las otras dos laderas presentan una mayor heterogeneidad interna a lo largo del transecto, por lo que sí se consideró oportuna la ampliación de su anchura, incorporando además una zona suplementaria por encima del vallado de la estación meteorológica donde se ubican las parcelas Gerlach de escorrentía y erosión (Figura 3.1.2). Que aunque este sector no presenta la continuidad necesaria hasta la base de la ladera para el análisis general de patrones, es relevante desde el punto de vista de la validación del modelo de simulación con los datos de las parcelas en condiciones de lluvia natural, por lo que este sector sólo se utilizará con este propósito. Las diferencias en la anchura de banda entre zonas no afectan al análisis ni posterior interpretación de los patrones.

3.1.1.1. Procedimientos en campo

Se construyó un sistema que permite la toma de fotografías perpendiculares desde una altura adecuada a la resolución pretendida. Se adaptó un único mástil de fibra de carbono de 6 m de longitud en cuyo vértice superior se situó la cámara fotográfica sobre un soporte diseñado *ad hoc* (Figura 3.1.3) con un mecanismo para el disparo manual de la cámara a distancia (Figura 3.1.4). La resolución y distancia focal de la cámara determina la altura máxima y tamaño de retícula óptimo para la obtención de imágenes con suficiente calidad para permitir el reconocimiento visual de los diferentes componentes superficiales.

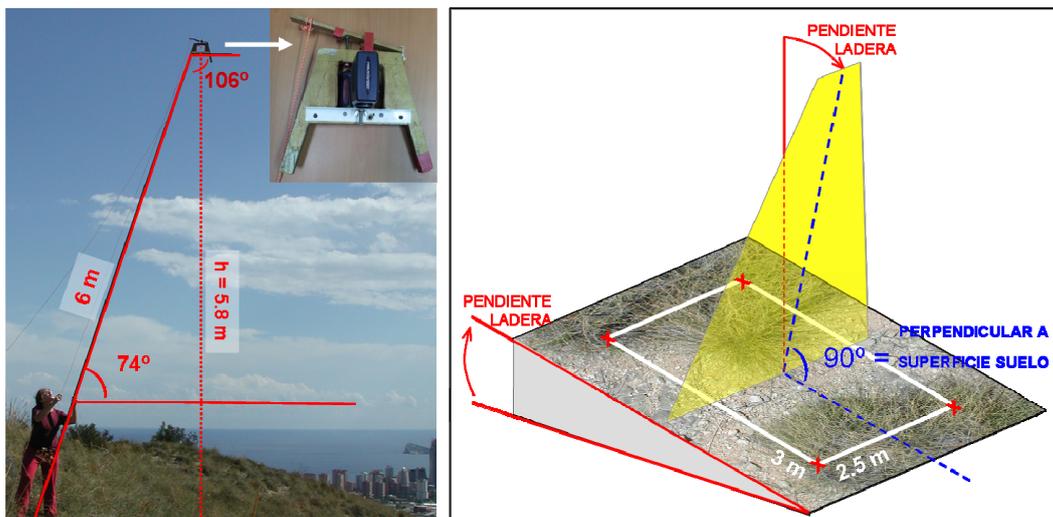


Figura 3.1.3 Metodología de toma de fotografías en altura: (Izda.) geometría del soporte de la cámara y (Dcha.) posicionamiento del soporte en el momento de la toma de fotogramas.

Las fotografías se realizaron con una cámara digital Nikon Coolpix 9900 de 3.4 Megapíxeles y máxima apertura de zoom de 35 mm. Con estas propiedades y situada a 5.76 m sobre la perpendicular de la ladera se pueden fotografiar parcelas de 2.5 m de ancho por 3 m en el sentido de la máxima pendiente, contando además con un margen suficiente (en torno a 50 cm a cada lado) para determinar los solapes y evitar posibles pérdidas de partes de la imagen por variaciones en el ángulo de inclinación de la cámara, habitualmente motivadas por el inevitable efecto del viento. Sobre la geometría de posicionamiento de toma de fotografías con respecto al plano superficial de la ladera mostrada en la Figura 3.1.3, cabe destacar el esfuerzo de diseño hacia un manejo unilateral del

soporte mediante una única pértiga (un modelo inicial necesitaba de dos pértigas de aluminio) con el objeto de minimizar la aparición de sombras en la fotografía, a la vez de dotarle de mayor autonomía en el manejo. En este sentido, el material de fibra de carbono del mástil aporta rigidez, lo que minimiza la flexión ejercida por el peso de la cámara, al tiempo que reduce considerablemente el peso del instrumental.

Previamente a la toma de fotografías, se marcaron en el campo los vértices de la retícula como puntos de referencia en cada fotograma. Para ello se estableció la línea de máxima pendiente desde la divisoria hasta la base de la ladera, marcada cada 3 m con un clavo etiquetado. Posteriormente se marcaron en paralelo líneas separadas 2.5 m a cada lado de la primera, en avance progresivo hasta alcanzar la anchura del transecto establecida. Se obtuvo así una cuadrícula compuesta por celdas de 2.5 m de base y 3 m de largo.

La selección del tramo de transecto se determinó en cada sitio a partir de criterios de representatividad respecto del conjunto de las laderas de la cuenca de estudio. En términos generales, el ancho mínimo del transecto estuvo determinado por la propia naturaleza de su distribución espacial, debiendo estar suficientemente recogida la configuración del patrón de vegetación/suelo desnudo.

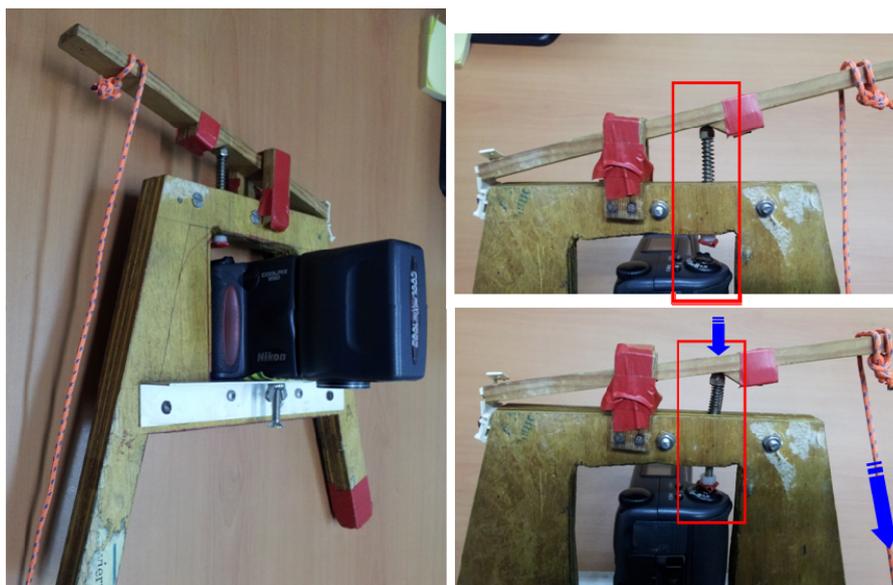


Figura 3.1.4 Dispositivo de control remoto para el soporte y disparo de la cámara. A la derecha se muestra el mecanismo de disparo de la cámara.

Posteriormente se levantó la topografía con precisión mediante una Estación Total (Sokkisha SET-5), tomando cada uno de los vértices de la retícula y al mismo tiempo otros puntos de la ladera, con el fin de disponer de un modelo digital de elevaciones (MDE) que permitiera tanto conocer el posicionamiento exacto de las marcas en el campo como las características morfológicas de las laderas estudiadas.

Se fotografió cada cuadro de la retícula de forma perpendicular a la superficie del terreno con el fin de minimizar distorsiones en la geometría de las fotografías (Figura 3.1.3). Tal como se ha señalado

anteriormente, en cada fotografía son visibles los 4 vértices marcados en la celda. Para minimizar las sombras en la imagen se tomaron las fotografías en la época del año con una menor inclinación del sol, en este caso en Junio de 2005, y durante las horas centrales del día.

3.1.1.2. *Reconstrucción del mosaico de imágenes*

El montaje de los fotogramas individuales en forma de mosaico de todo el transecto de ladera se realizó mediante la georreferenciación de cada escena a la retícula obtenida a partir de la topografía de campo. Esta malla de puntos resultante constituyen los puntos de control que son la base para la corrección geométrica de los fotogramas individuales.

La georreferenciación de cada fotograma a su lugar correspondiente en la malla se realizó con el módulo *Georeferencing* de ArcGis 9.2. Utilizándose un mínimo de 4 puntos de referencia, correspondientes a los cuatro vértices marcados en el campo. Para el ajuste de coordenadas de cada pixel de la imagen ráster se utilizó el método de transformación de *primer orden* o *Affine* que permite mover, redimensionar y rotar las imágenes con un número mínimo de puntos de referencia como es el caso. El método de interpolación o *resampling* utilizado para la reconstrucción de la imagen una vez se produjo su transformación geométrica fue el de *convolución cúbica* (*cubic convolution*) apropiado para datos de tipo continuo y que produce un resultado de mayor contraste de la imagen, en contraposición al método de *interpolación-bilineal* que tiene un efecto de suavizado entre pixeles vecinos que se trató de evitar en nuestro caso puesto que se pretendía discriminar en la imagen entidades con mucho detalle.

Posteriormente, a cada fotograma georreferenciado se le recortaron los solapes excesivos, y el conjunto de imágenes rectificadas se transformó en un mosaico continuo. Ambas tareas se realizaron con las aplicaciones incluidas en ERDAS IMAGINE 8.5, para tales efectos, *Subset Image* y *Mosaic Image* ambos del módulo *Data Preparation*.

El producto final fue una imagen RGB, georreferenciada y escalada a la topografía de la ladera, y que con una resolución de 3 mm por píxel muestra todos los detalles de la superficie del suelo y cobertura vegetal de la ladera, a la que denominamos *foto-mosaico*.

3.1.2. **Cartografía de componentes superficiales del suelo (CSS)**

Los criterios de cartografía se establecieron con el propósito de obtener un mapa de distribución de unidades superficiales homogéneas con un comportamiento hidrológico uniforme frente a la escorrentía, lo que venimos llamando *componentes superficiales del suelo* (CSS). La definición *a priori* de estas *unidades de respuesta* constituye la leyenda de cartografía.

Se concretó el concepto de *Componente Superficial del Suelo* (CSS) como *la expresión más elemental que resulta visible, identificable y discreta de aquellas propiedades superficiales del suelo*

que afectan al comportamiento hidrológico (Arnau *et al.*, 2008) y por tanto funcionan como unidades homogéneas de respuesta.

Esta definición sobrepasa la mera consideración de elementos presentes en la superficie del suelo con entidad propia, como son los individuos de plantas y los fragmentos rocosos individuales, y pretende un mayor grado de abstracción aglutinando fracciones superficiales del suelo con una respuesta integrada a la escorrentía. El caso paradigmático es la consideración de los fragmentos rocosos (FR) mediante intervalos de cobertura, en el que es inherente la fracción complementaria de suelo desnudo, no teniendo ningún sentido en nuestro propósito la consideración individualizada de cada fragmento rocoso de manera independiente. Análogamente es tratada la vegetación, de forma que cuando los individuos de planta quedan espacialmente agrupados, son considerados conjuntamente en una entidad.

La cartografía se realizó mediante fotointerpretación en pantalla, consistiendo en la identificación visual y digitalización simultánea con ArcGis 9.2. Dada la naturaleza compleja de las unidades que configuran la leyenda a esta escala de análisis en cuanto a forma, cobertura y posición no se consideró adecuada una cartografía automática basada en principios de clasificación de imágenes.

El resultado fue un mapa de CSS de un transecto de anchura representativa del patrón por la longitud de la ladera siguiendo la línea de máxima pendiente.

3.1.2.1. *Leyenda de la cartografía*

El primer antecedente en la propuesta de una leyenda de cartografía que establece unas tipologías de superficie poniendo de manifiesto una respuesta contrastada frente a la escorrentía se encuentra en Calvo *et al.* (2003b). Esta propuesta inicial fue modificada y readaptada para nuestras dos zonas de estudio (Arnau *et al.*, 2008).

La base lógica general de construcción de la leyenda (Figura 3.1.5), cuyo criterio fundamental es el de definir entidades superficiales de respuesta homogénea, recopiló el conocimiento existente sobre el comportamiento hidrológico a escala de parcela en la bibliografía científica. Un criterio secundario de incorporación a la leyenda fue el de abundancia relativa, debiendo ser una clase lo suficientemente representativa en la zona como para ser cartografiada. Esta es una lógica genérica versátil que permite su adaptación a cualquier casuística.

Ciclo biótico

La vegetación, la materia seca de ésta y la presencia de Costras Biológicas del Suelo (CBS) son las tres subcategorías que se incluyeron en el bloque biótico.

Los diferentes ítems referidos a las **superficies vegetadas** se concretaron por los criterios de fisonomía de la planta y de dominancia de la especie. En relación a la estructura de la vegetación se

discriminaron los tres estratos de vegetación herbáceo, arbustivo y arbóreo cuyos contrastes en la arquitectura de planta promueven diferencias en los mecanismos de interceptación, flujo cortical y trascolación (Belmonte-Serrato y Romero-Díaz, 1998; Wainwright *et al.*, 2000; Casermeiro *et al.*, 2004). Si bien se evidencia una respuesta general de la vegetación como sumidero de la escorrentía al mejorar las propiedades del suelo que propician la infiltración, otros procesos relacionados con la dinámica de movilización de sedimento se suponen influenciados por la propia fisionomía de la planta, especialmente en lo referente a su base de contacto con el suelo. Asimismo, se contempló la posibilidad de ampliar las clases de vegetación según la relativa dominancia de una determinada especie o grupo fisiológico que interesase ser destacado por otras cuestiones de dinámica de redistribución de CSS.

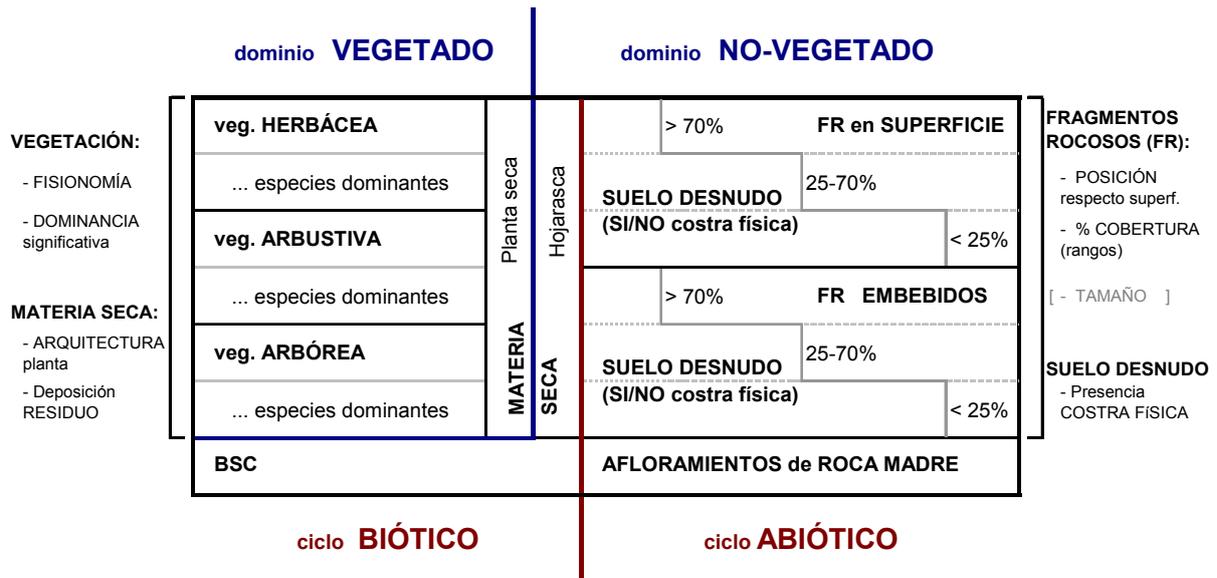


Figura 3.1.5 Lógica general y criterios para la construcción de la leyenda. FR: fragmentos rocosos; BSC: costras biológicas del suelo (*Biological Soil Crusts*)

La **materia seca** vegetal es una categoría en la que se discriminó entre (i) las *plantas secas o muertas* que todavía mantenían la arquitectura de la planta, y por tanto conservaban en algún grado las propiedades de interceptación e infiltración de la planta viva (protección del suelo y flujos por macroporos por el sistema radicular), y (ii) la *hojarasca*, que como mera deposición de residuo seco presentaba una configuración amorfa sobre la superficie del suelo cuyo efecto es el de amortiguación y protección de la superficie a los impactos de las gotas de lluvia. A diferencia de las plantas secas, la clase hojarasca se consideraba dentro del dominio NO-VEGETADO pues se alejaba de los mecanismos característicos de la vegetación al perder la arquitectura propia de las plantas (Figura 3.1.5).

En el caso de una presencia significativa de **costras biológicas del suelo** (CBS), es de especial relevancia la discriminación de esta clase de componentes debido a su importante influencia sobre la escorrentía y el balance hídrico general (Belnap y Eldridge, 2003; Chamizo *et al.*, 2012). Esta subcategoría engloba una amplia variedad de comunidades de microorganismos del suelo como son las costras de cianobacterias, los musgos y líquenes, estos últimos con una amplia diversidad de especies que pueden llegar presentar una gran variedad de morfologías, y por tanto con diferente respuesta a la escorrentía. Esta clase aunque salga por cuestiones obvias del dominio VEGETADO, se mantiene dentro del ciclo biótico, al igual que ocurre con la hojarasca.

Ciclo abiótico

La parte abiótica de la cobertura se resume a superficies ocupadas por afloramientos de roca madre y con algún grado de cobertura de fragmentos rocosos (FR). Precisamente en el entorno mediterráneo, dónde es característica la presencia generalizada de una elevada pedregosidad en el espacio de suelo entre la vegetación dispersa (Poesen, 1990).

Pero la cuestión adquiere complejidad ante el hecho de que el fenómeno de la pedregosidad superficial puede manifestar un amplio rango de configuraciones con una variabilidad significativa en la respuesta de la escorrentía y un papel dinámico en los procesos de erosión (Kirkby *et al.*, 1998). Los tres aspectos de la pedregosidad que se han demostrado controlan la respuesta son: (i) el grado de cobertura de FR, (ii) la posición de los FR respecto de la superficie del suelo y (iii) el tamaño de los FR (Poesen *et al.*, 1990; Lavee y Poesen, 1991; Poesen y Ingelmo, 1992; Moustakas *et al.*, 1995; Poesen *et al.* 1994). Respecto de la fracción de suelo estrictamente desnudo la presencia o no de costra mineral es otro aspecto relevante que marca el comportamiento hídrico y erosivo.

La presencia de FR propicia la infiltración puesto que ejercen un efecto de protección de la superficie del suelo a los impactos de las gotas de lluvia y son un elemento que ralentiza la escorrentía por el incremento de la rugosidad. Por lo que la relativa abundancia de FR es una variable que modula la acción de los procesos. Se establecieron tres intervalos de porcentaje de cobertura de FR: presencia menor del 25%, entre el 25-70% y mayor de 70% (Figura 3.1.5). Los límites del intervalo se definieron de acuerdo a los resultados obtenidos por diversos autores (p.e. Francis y Thornes, 1990; Calvo-Cases *et al.*, 1991) que encuentran un umbral de descenso drástico de la escorrentía y la erosión con coberturas del 20 al 25%, sea de vegetación o de FR. El intervalo superior de >70% de FR corresponde con una situación de cobertura prácticamente total e incluso de “blindaje de la superficie del suelo” frente a la precipitación y de enorme rugosidad para la escorrentía.

El modo en el que los FR se disponen respecto a la superficie del suelo, bien (i) embebidos (semi-enterramiento o exhumación según el proceso implicado) o bien (ii) asentados sobre la superficie (Figura 3.1.5), es otro de los factores relevantes en la respuesta puesto que modifican la propia hidráulica del flujo superficial. La situación de los FR en una posición sobre la superficie es la más favorable al proceso de infiltración (Poesen e Ingelmo, 1992). Ambas circunstancias tienden a producirse simultáneamente en el espacio, puesto que son estadios progresivos del proceso general de erosión del perfil del suelo por evacuación del material fino. Sin embargo, la diferenciación entre las dos clases para la leyenda de la cartografía hace referencia a la ocurrencia predominante de una de las situaciones en un mismo punto. El relativo predominio en un caso u otro informa además otras cuestiones de balance sedimentario que interesa al análisis de la distribución de CSS.

En la aproximación de *proceso-patrón*, la posición y el grado de cobertura de los FR son dos temas fundamentales que evidencian diferentes estadios de degradación o evolución de la superficie. En cierta medida es un vestigio visible de la dinámica geomorfológica de meteorización, transporte y deposición, no exento sin embargo de posibles ambigüedades en la interpretación (principio de ecuifinalidad en el análisis de sistemas), pero que sin duda aportan un valioso testimonio sobre la dinámica de las laderas. En este sentido los bucles de retroalimentación propuestos por Kirkby *et al.*,

1998 (ver Figura 1.8) son un marco metodológico muy apropiado para el análisis e interpretación de los patrones de distribución de los CSS.

Se ha evidenciado asimismo que el tamaño de los FR es otro factor que controla en alguna medida la respuesta a la escorrentía (Poesen y Ingelmo, 1992; Poesen *et al.*, 1994; Valentin, 1994), a la vez que puede resultar interesante en la interpretación de la redistribución de CSS a lo largo del transecto. Es por ello que este criterio se incorpora en la lógica general de construcción de la leyenda como una variable más de discriminación de CSS (Figura 3.1.5) soportada por el conocimiento previo existente. Sin embargo, ya *a priori* y como criterio metodológico se ha optado por excluirlo de la consideración en la definición de la leyenda para nuestras áreas de estudio, no hay estudios que establezcan la influencia de las clases de tamaño y pues no se evidencia semejante disparidad granulométrica en los FR que justifique su incorporación y la consiguiente multiplicación de tipologías de CSS por el cruce de factores.

En referencia a la fracción de suelo desnudo que complementa junto a los FR individuales la entidad superficial referida a la pedregosidad, se incluye como criterio de definición de CSS la posible presencia de costra física en superficie. Esta costra es el resultado de la dispersión de los agregados a nivel superficial por el impacto de las gotas de lluvia y supone el sellado de la superficie a lo largo del evento reduciéndose así la infiltración (Morin y Benyamini, 1977; Farres, 1978; Roth y Helming, 1992; Greene y Hairsine, 2004). Este fenómeno es especialmente relevante en aquellos suelos con una pobre estabilidad de agregados en superficie. Por ello la propensión a la formación de costras físicas *a priori* se considera una característica genérica del sitio más que una propiedad que se distribuya heterogéneamente en la unidad de ladera, sin que esta apreciación se oponga al hecho que existan zonas preferentes de formación de costra superficial (p.e. zonas de acumulación de sedimento fino).

3.1.2.2. Criterios de fotointerpretación de los CSS

En el proceso de digitalización se ha establecido una serie de criterios de fotointerpretación según la propia casuística de los diferentes CSS.

Un criterio necesario en cualquier proceso de cartografía es determinar la **unidad mínima cartografiable**, que equivale al tamaño de polígono mínimo posible. Para el caso de la vegetación se han cartografiado plantas individuales hasta un tamaño mínimo de 20 cm². Este umbral es el mismo para las manchas de afloramientos rocosos y materia seca. Sin embargo, para el resto de clases referidas a los diferentes grados de pedregosidad el umbral de tamaño mínimo se ha establecido en 100 cm². Esta disparidad de criterios de debe a que la pedregosidad requiere de un mayor margen espacial para manifestarse como entidad homogénea, precisamente por el hecho de ser una composición de FR y suelo desnudo.

La digitalización de plantas se ha realizado en su proyección sobre la horizontal, esto es, incluyendo en el polígono toda el área de la corona de cada planta o agrupación de plantas, sobrepasando el área en la que la planta tiene completo contacto con el suelo (Figura 3.1.6), cuestión que por otro lado carecería de sentido en especies leñosas. Observaciones en campo y trabajos anteriores (Boix-

Fayos *et al.*, 2001) confirman que la corona completa de la planta ejerce un papel protector de la superficie, manteniendo así una buena estructura del suelo y dotando a toda la superficie bajo planta de una respuesta hidrológica homogénea.

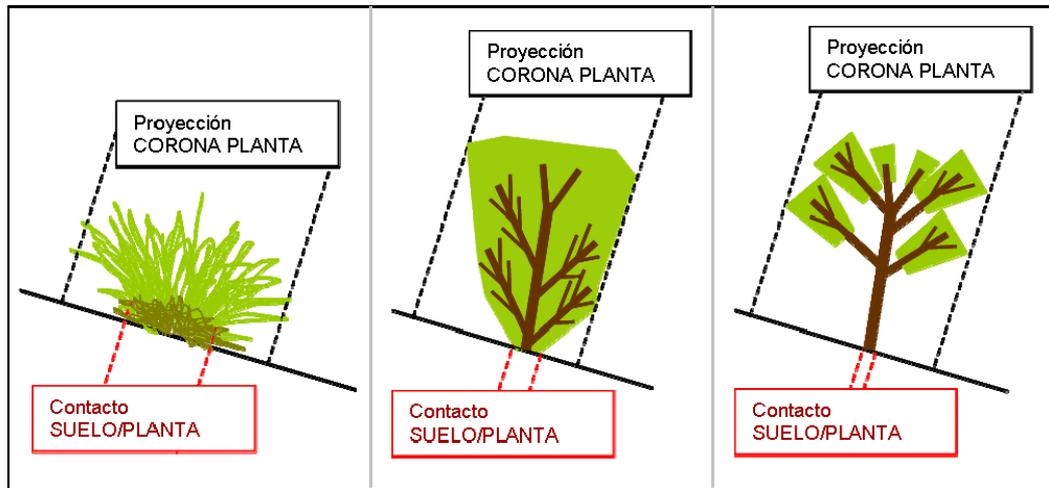


Figura 3.1.6 Criterio de cartografía del área de planta ejemplificado en diversas fisionomías de vegetación: (a) *Stipa tenacissima*; (b) arbusto tipo *Rosmarinus* o *Ulex parviflorus* y (c) *Cistus*.

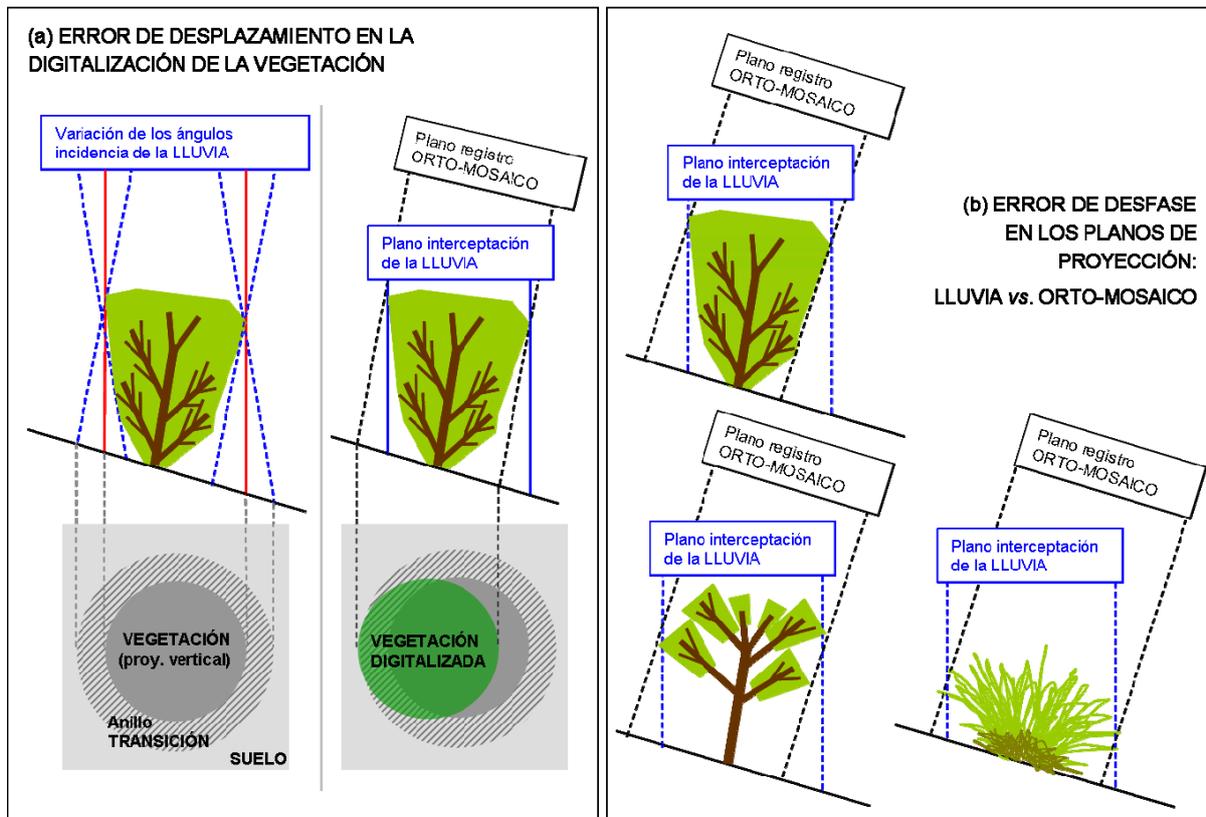


Figura 3.1.7 Justificación de/Ilustración de los errores producidos en el proceso de digitalización de la vegetación a partir del foto-mosaico debidos al propio sistema de toma de las imágenes.

El hecho de que la toma de fotografías se realice desde una perspectiva perpendicular a la superficie del suelo para evitar la distorsión en la imagen, afecta al mapeo de aquellos CSS que presentan cierta altura desde la superficie, como es el caso de la vegetación, tal y como se muestra en la Figura 3.1.7. Sucede que el plano de registro del fotograma (oblicuo) no coincide con el plano de interceptación teórico de la lluvia (vertical), y por tanto se produce cierto desfase en la proyección de la planta hasta el suelo (ver Figura 3.1.7), mayor cuanto mayor es la altura de la planta.

En términos absolutos se considera éste un error despreciable ya que por un lado la cobertura total no se ve afectada sino que se produce un mero desplazamiento del polígono digitalizado de la planta aguas arriba (Figura 3.1.7). Además, este desplazamiento tiene un efecto mínimo en el posterior análisis e interpretación de la configuración de CSS al suponer que se produce dentro de una zona de influencia de la corona de la planta. Considerando que la lluvia por efecto del viento varía frecuentemente su ángulo de incidencia respecto de la vertical, asumimos que existe un anillo de transición con una condición ambivalente entre eventos, de sombra o de área de exposición a la lluvia (Figura 3.1.7). Este efecto consideramos que neutraliza el error de desfase que se comete entre el área de la planta en su proyección vertical y el área de la planta digitalizada.

3.1.3. Herramientas de análisis de la distribución de componentes superficiales del suelo: Análisis de patrones.

La **heterogeneidad espacial** es una propiedad básica que define estos subambientes y que rige su funcionamiento, reconociéndose como la responsable de la respuesta compleja y no-lineal de estos sistemas. Sin embargo abordar la caracterización de ésta es una cuestión compleja, teniendo además en cuenta que es dependiente del proceso o fenómeno objeto de análisis (Aguiar y Sala, 1999; Cadenasso *et al.*, 2006; McDonnell *et al.*, 2007; Troch *et al.*, 2009).

Existe una amplia tradición de intento de aproximación a este tema desde la disciplina de la Ecología del Paisaje (**Landscape Ecology**), con el objeto de caracterización de la estructura o configuración de patrones espaciales de distribución desde la perspectiva de la métrica espacial o morfometría (Wu y David, 2002; Schroder y Seppelt, 2006). El análisis de esta configuración espacial es un tema especialmente complejo que engloba aspectos **geométricos** relacionados con el tamaño, la forma, la ordenación y relaciones espaciales entre elementos, en las que la direccionalidad de los procesos que operan y la resolución de observación son aspectos fundamentales que determinan estas relaciones (Turner *et al.*, 1989; Levin, 1992). Sin embargo, esta manera de aproximación ha sido infructuosa en el campo de los procesos asociados a la hidro-geomorfología (Imeson y Prinsen, 2004), sin obtener resultados satisfactorios en la comprensión de los subprocesos y funcionamiento global del sistema .

Aquí se propone una aproximación metodológica diferente, que parte de la redefinición del término **configuración espacial**, afín al marco teórico conceptual, descrito en el capítulo de Introducción (Figura 1.5), de la Teoría General de Sistemas, haciendo especial hincapié a la estructura de escalas del sistema (Teoría Jerárquica) y sus implicaciones en la consideración de procesos. Así, el **concepto de configuración espacial** se entiende como una propiedad emergente de la **ordenación o estructura de distribución** en el espacio de **componentes** desde niveles de **escala** inferiores (de mayor detalle),

resultado de los procesos de transferencia de materia y energía. Esto fija la atención en el **análisis de la composición**, y en este caso concreto, de la composición de la unidad mínima interpretable en términos de procesos, que son los **componentes superficiales del suelo (CSS)** que corresponden al nivel de escala inferior considerado de los tres expuestos en el apartado 1.1.5, el parche (*patch*).

Si bien desde el contexto de la Ecología del Paisaje y la métrica espacial se toma la acepción de configuración como “**aspecto, forma exterior** de una cosa” (configuración geográfica), aquí se recoge en su otra vertiente de “**disposición y forma de las partes que componen un todo**” (configuración de los componentes). En síntesis, el análisis de **patrones** espaciales se basa en el análisis de la distribución de la composición o presencia de CSS a diferentes niveles de escala.

La estrategia general de análisis aplicado a los datos se muestra en la Figura 3.1.8, donde la primera cuestión es la **constatación de heterogeneidad en la composición (i)**, que aunque supuesta, se busca una metodología de cuantificación para su comparación mediante los índices de diversidad y similitud en las dos escalas de análisis, la de sitio y ladera.

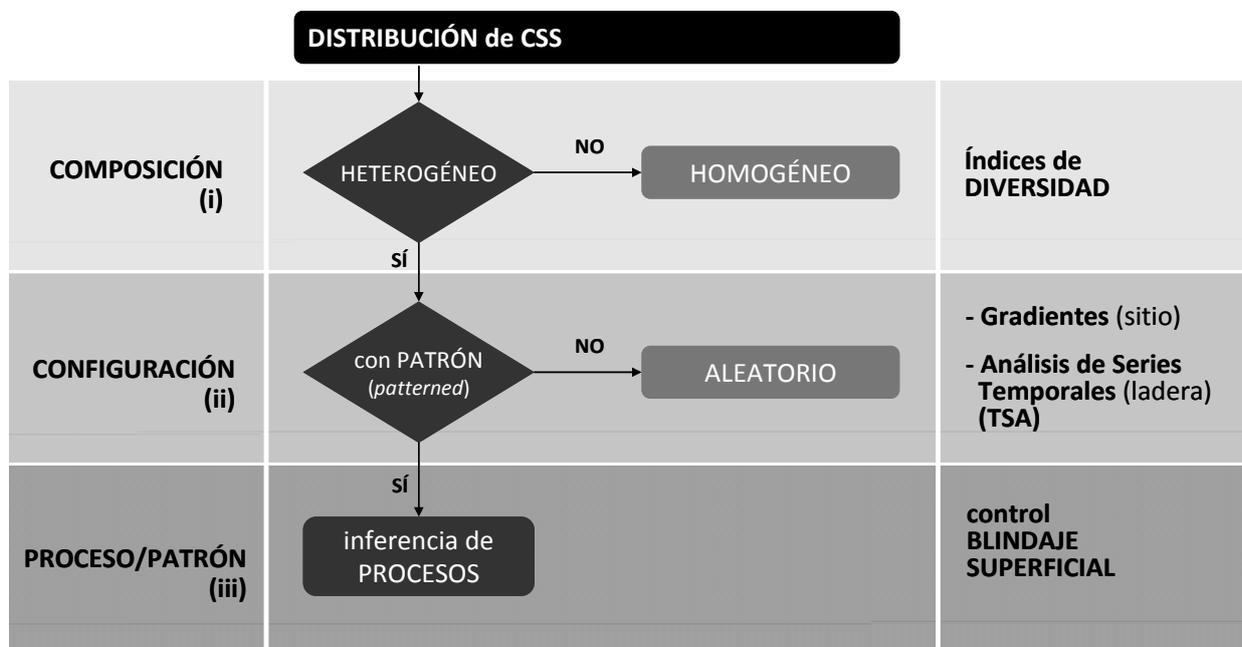


Figura 3.1.8 Ruta metodológica de análisis de la distribución de CSS bajo la perspectiva proceso/patrón.

La segunda cuestión que se plantea es la **identificación de patrones (ii)**, esto es, si existen distribuciones espaciales no-aleatorias que sigan un orden o lógica de reparto asociada a procesos. Esta ausencia de aleatoriedad significa un estado **no-estacionario**, o lo que es lo mismo, presencia de **tendencias o periodicidad** espaciales en la distribución de CSS, que a escala de ladera se realiza mediante técnicas de Análisis de Series Temporales (TSA) siendo relevante la posición relativa en el transecto. A escala de sitio se busca la identificación de gradientes, dependientes en este caso de la variable climática.

Si se evidencia la existencia de patrones, la tercera fase es la **interpretación de éstos en términos de procesos**, en este caso los relacionados con el flujo superficial (agua y sedimentos) donde el blindaje superficial se considera un mecanismo clave de control.

3.1.3.1. Análisis de diversidad

En ecología la **heterogeneidad en la composición** se mide mediante **índices de diversidad** (Miyashita *et. al*, 2014), que pese a su proliferación, los de uso más extendido son los de Shannon (Shannon y Weaver, 1949) y de Simpson (Simpson, 1949). El concepto diversidad aglutina dos dimensiones, riqueza y uniformidad o equidad (*evenness*) o dominancia (i.e. 1-equidad). **Riqueza** es sencillamente el número de clases presentes, sin ninguna consideración sobre su abundancia, representando la dimensión meramente de composición de la diversidad. **Equidad** se refiere a la frecuencia de distribución o abundancia de los diferentes componentes, y se considera la dimensión estructural de la diversidad. Dependiendo del índice, varía la relevancia que se le concede a una u otra dimensión de la diversidad. Índices como el de Shannon son más sensibles a la dimensión *riqueza*, y por tanto clases muy escasas tienen una relevancia desproporcionada en la magnitud final del índice. Sin embargo, índices como el Simpson, ponderan más en favor de las clases de componentes más abundantes.

Se opta aquí por el índice de Simpson (Mc Garigal, *et al.*, 2012), cuya interpretación es la probabilidad de que dos puntos seleccionados aleatoriamente sean de diferente tipo. Su valor incrementa a medida que aumenta el número de clases y la equidad en su distribución.

$$D = 1 - \sum_{i=1}^S (P_i)^2 \quad \text{(Ecuación 1)}$$

Donde:

S: número de clases de CSS por ladera

P_i: porcentaje de cobertura de la clase CSS i

Del mismo modo, se proporciona el índice de Equidad de Simpson (Mc Garigal, *et al.*, 2012). La mayor parte de índices de diversidad tienen su correspondiente índice de equidad derivado de ellos, en los que se aísla la componente de equidad mediante el control de la contribución de la riqueza al índice global de diversidad. Así pues, se expresa como el grado de diversidad observado dividido la máxima diversidad posible según la riqueza concreta (Mc Garigal, *et al.*, 2012).

$$SIEI = \frac{1 - \sum_{s=1}^n P_i^2}{1 - \left[\frac{1}{m} \right]} \quad \text{(Ecuación 2)}$$

Donde:

m: número de clases de CSS por ladera

P_i: porcentaje de cobertura de la clase CSS i

Desde cierto sector de la ecología se ha criticado el uso de este tipo de índices de diversidad por el hecho de que no consideran en ningún sentido el valor que pueda aportar cada una de las especies a la diversidad de las comunidades (Mc Garigal, *et al.*, 2012). Sin embargo, esta perspectiva sí se adecua a nuestro contexto de análisis de la composición de CSS, donde cada tipología de componente no tiene una mayor relevancia que otra en términos de idoneidad, sino que se busca una medida de heterogeneidad global y neutral.

Este análisis de diversidad se realiza tanto a escala de sitio, considerando los valores globales de cada transecto (0D), como a escala de ladera, que informa sobre su distribución longitudinal interna (1D). En este caso se han tomado bandas transversales de 0.5 m desde la divisoria a la parte baja de la ladera, calculando para cada una de ellas la cobertura relativa de cada clase de CSS (Figura 4.9 y 4.10).

Además a escala de sitio se utilizan aquí algunos índices que cuantifican el grado de similitud (o contraste) en términos de composición entre transectos (pares de muestras): índice de similitud de Jaccard y el de disimilitud de Bray-Curtis.

Coefficiente de Similitud o Índice de Jaccard (J) (Jaccard, 1912), que basado en presencia/ausencia, fija la atención en la riqueza de clases y se define como el tamaño de la intersección dividido el tamaño de la unión de ambas:

$$J = \frac{a}{a + b + c} \quad \text{(Ecuación 3)}$$

Donde:

a: número de CSS presentes en ambas laderas

b: número de CSS presentes sólo en la ladera j

c: número de CSS presentes sólo en la ladera k

Índice de Disimilitud o Distancia de Bray-Curtis (B) (Bray y Curtis, 1957), que considera además de la presencia/ausencia de clases, su abundancia, y trasciende así la mera diferencia en la riqueza de especies o clases, informando sobre su relativa distribución:

$$B = \sum \frac{|x_{ij} - x_{ik}|}{|x_{ij} + x_{ik}|} \quad \text{(Ecuación 4)}$$

Donde:

x_{ij} : porcentaje de cobertura del CSS i perteneciente a la ladera j

x_{ik} : porcentaje de cobertura del CSS i perteneciente a la ladera k

3.1.3.2. Identificación de patrones a escala de ladera

Respecto de la configuración espacial de los CSS, se parte de la **premisa** fundamental de que los procesos geomórficos dominantes que interactúan en la distribución de éstos tiene una componente predominante en sentido longitudinal a la máxima pendiente como resultado de los procesos superficiales (i.e. escorrentía y sedimentos y otros movimientos gravitacionales). Y por tanto se le atribuye *a priori* una **condición de anisotropía** en su distribución, cuyas propiedades son dependientes y varían con la dirección, a diferencia de lo que ocurre por ejemplo con un proceso espacial aleatorio cuyo patrón es isotrópico u homogéneo en todas las direcciones (i.e. la autocorrelación espacial actúa de la misma forma en todas las direcciones).

Si bien se reconoce la **variabilidad lateral** en las laderas resultado de cambios estructurales, litológicos, topográficos, de exposición, etc., cabe esperar que en el entorno de análisis seleccionado, aquí restringido a una relativa estrecha banda longitudinal de ladera, estas condiciones se mantengan en algún grado invariables, y por tanto una casi nula heterogeneidad en sentido transversal al transecto.

Al ser esta una cuestión fundamental en el **trasfondo del objetivo de análisis** de la distribución de CSS en relación con los flujos superficiales, **se inspecciona la variabilidad en la cobertura de CSS en ambos sentidos, transversal y longitudinal** al sentido de máxima pendiente general de las laderas (i.e. desde la divisoria hasta la base de los transectos), en lo que hemos denominado *test de anisotropía* en el capítulo 4 de resultados (Figura 4.8). Para ello se calculan y comparan los porcentajes de cobertura de cada clase de CSS en tramos consecutivos de 0.5 m de ancho en bandas transversales por un lado, y longitudinales en otro. El resultado que valide la hipótesis de partida debe ser de una cierta homogeneidad lateral frente a una marcada variabilidad longitudinal. Una vez probada la propiedad de anisotropía del transecto siendo **unidireccional en el sentido del flujo**, ya sólo **interesa la secuencia de ordenación de CSS** en sentido longitudinal.

De esta manera se obtienen series de datos correlativos de % de cobertura para cada CSS según la dirección y sentido seleccionados, de una manera análoga a lo que representan las Series-Temporales donde el tiempo se sucede ordenadamente a intervalos de tiempo equidistantes. En este sentido podemos hablar por similitud de la obtención de **Series-Espaciales** que nos permite la adopción de metodologías propias de la disciplina estadística de **Análisis de Series Temporales**, específicas para el análisis de patrones *temporales*, aunque *espaciales* en nuestro caso concreto. Interesa a este respecto únicamente la variabilidad longitudinal ladera abajo.

Para las clases de CSS referidas a rangos de % de cobertura de fragmentos rocosos se obtiene además la correspondiente fracción promedio de fragmentos de roca y de suelo desnudo. Esto se realiza mediante una transformación que asume el valor central entre los límites del intervalo como coeficiente de cálculo de la cobertura total de fragmentos rocosos.

Tipificación de patrones de distribución: función de auto-correlación y análisis espectral

Con el propósito de analizar la secuenciación en la distribución de CSS desde la divisoria hasta la parte baja de la ladera se toma del Análisis de Series Temporales los métodos de **auto-correlación** y **análisis espectral** de manera combinada tal y como muestra la Figura 3.17 (según Nielsen y Wendroth, 2003). De este tipo de análisis nos interesa el tratamiento de los datos manteniendo el orden secuencial de los sucesos, que en términos generales se usa en las series temporales, pero que en este caso se trata del orden secuencial de los % de cobertura en bandas transversales de 0.5 m. Así mediante la combinación de ambos análisis conseguimos la tipificación de los diferentes patrones de distribución en términos de su relativa periodicidad de ocurrencia.

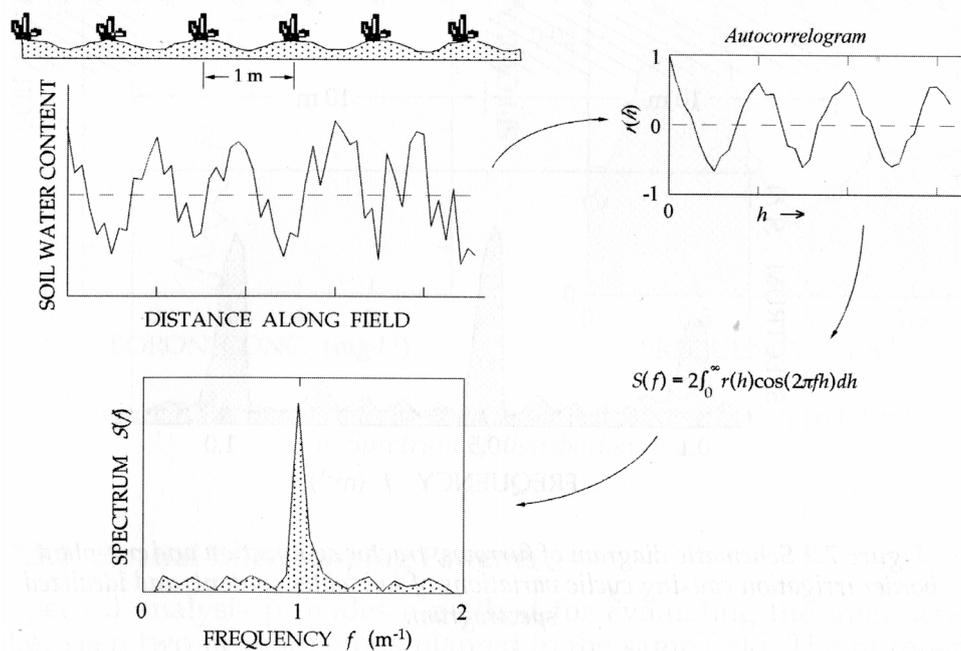


Figura 3.1.9 Metodología de análisis de Series Temporales. Fuente: Donald R. Nielsen y Ole Wendroth (2003).

A partir de la *serie espacial* original de % de coberturas (Figura 3.1.9) se calcula la *función de Autocorrelación* que se define como la correlación cruzada de la señal consigo misma, y se basa en el coeficiente de autocorrelación que cuantifica el grado de asociación lineal entre pares de valores separados por una determinada distancia. Cuya salida gráfica es el llamado *Autocorrelograma* que representa el coeficiente de autocorrelación frente a la distancia entre pares de medidas. Se obtiene así el alcance -en términos de distancia- y la magnitud de autocorrelación y su nivel de significación. Según el patrón real de distribución del CSS correspondiente a lo largo del transecto de ladera se obtienen diferentes configuraciones características del autocorrelograma las cuales serán interpretadas en términos de procesos. La cuestión clave es que la autocorrelación de una secuencia periódica mantiene dicha periodicidad, pero con la ventaja de ser un primer grado de generalización o filtrado de la señal original (secuencia de coberturas) extrayendo su carácter fundamental.

En una segunda fase se trata de detectar el comportamiento periódico o patrones cíclicos en la redistribución de los CSS a lo largo del transecto. Esta cuestión es especialmente interesante en un

contexto en el que la vegetación se caracteriza por una distribución discontinua, y en la que se supone la repetición de configuraciones de CSS por subtramos de igual condición (pendiente, posición, etc.). La operación de procesos en cada subtramo se supone equivalente en el que la presencia de parches de vegetación opera a modo de reinicio.

Para ello se construyen los **Periodogramas** (Figura 3.1.9), técnica no-paramétrica de estimación del *spectrum* que detecta cualquier periodicidad en los datos mediante la observación de picos en las frecuencias de la señal (i.e. la serie espacial). Este mide aportaciones a la varianza total de la serie de componentes periódicos de una frecuencia determinada. Si el periodograma presenta un *pico* en una frecuencia, indica que dicha frecuencia tiene mayor *importancia* en la serie que el resto. El periodo del ciclo (T) correspondiente a cada pico o máximo relativo que resulta en el periodograma se calcula como la inversa de la frecuencia (f) en la que aparece (Figura 3.1.9). La serie de datos con la que se construyen los periodogramas son los valores de los coeficientes de autocorrelación para cada distancia que se han obtenido anteriormente (Figura 3.1.9).

El periodograma está basado en una herramienta matemática denominada *Transformada de Fourier*, según la cual, una serie puede descomponerse como suma de un número finito o infinito de frecuencias. Dependiendo de las frecuencias resultantes de esta descomposición, los procesos que representan se dividen entre periódicos, aperiódicos y estocásticos en términos frecuenciales, cuya manifestación en términos de patrones de distribución espacial está ejemplarizada en la Figura 3.1.10.

Las series **estocásticas o aleatorias** presentan densidad espectral en un rango continuo de frecuencias, a modo de ruido de base en la forma del periodograma, sin destacar la presencia de ningún *pico máximo* significativo, representando patrones espaciales aleatorios, sin ninguna regularidad en su distribución (Figura 3.1.10).

Las series **aperiódicas** presentan un periodograma continuo, es decir, existe *masa* en un *infinito* número de frecuencias. Su equivalencia son patrones de distribución concentrados en algún momento de la secuencia o transecto (Figura 3.1.10).

Las series **periódicas** presentan un periodograma discreto, es decir, solo existe *masa espectral* o *picos* en aquellas frecuencias contenidas en la serie, siendo éstas un número discreto. Su traducción en términos de patrones son series que presentan ciclos periódicos o regulares en la ocurrencia del suceso, en este caso, la presencia de CSS en la secuencia (Figura 3.1.10).

Toda esta metodología se materializa en el apartado 4.2.3 de resultados de análisis de patrones (Figura 4.12) donde se trata de evidenciar la ausencia de aleatoriedad en la distribución de CSS, y por tanto encontrar patrón regular de distribución. Para a continuación en el siguiente apartado de resultados 4.2.4 utilizarlos para su interpretación en términos de procesos en el marco de cada una de las laderas de estudio tal y como se describe en el apartado siguiente.

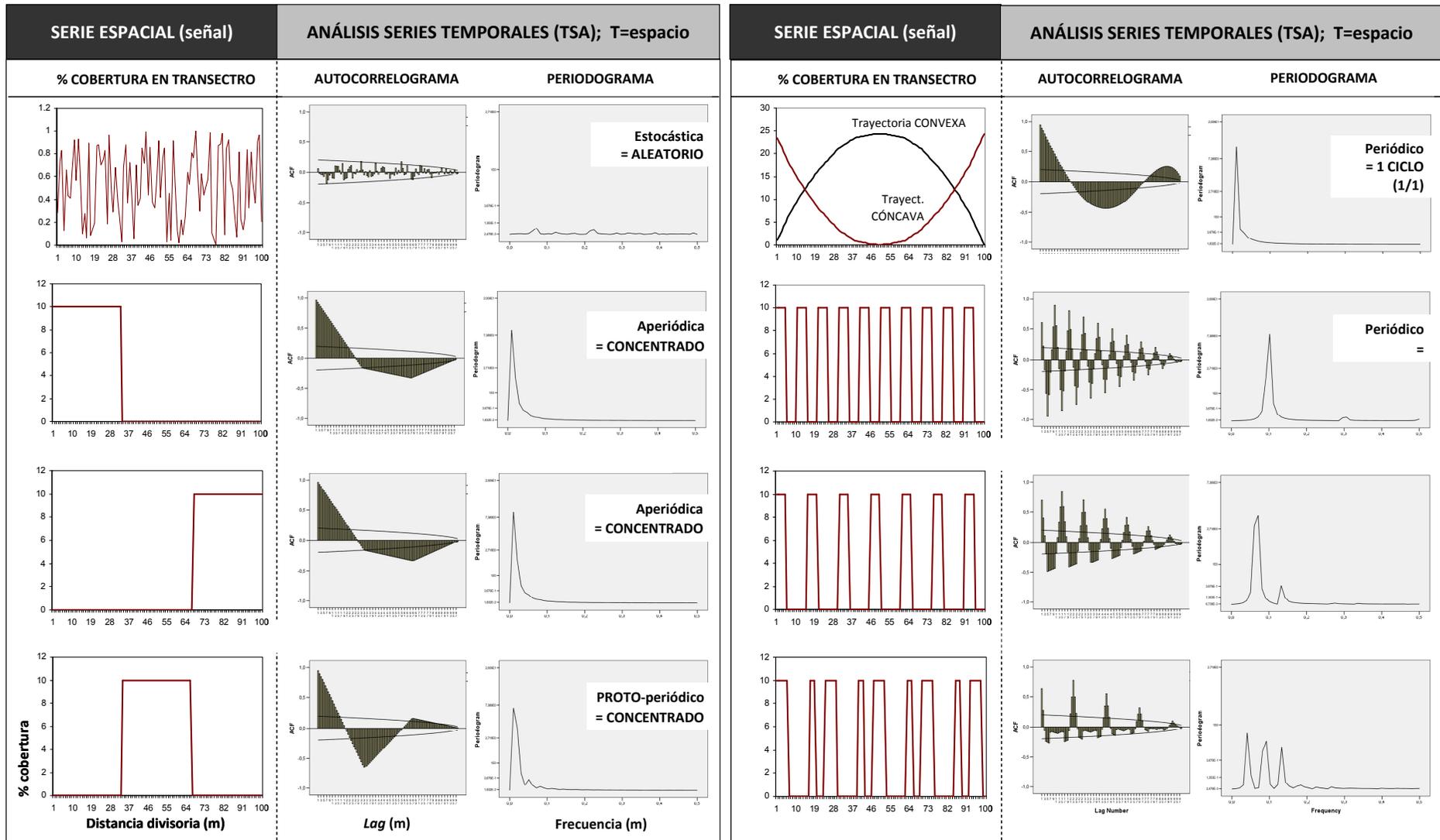


Figura 3.1.10 Configuraciones características del autocorrelograma como base de interpretación de los patrones de distribución de los CSS.

3.1.3.3. *Dinámica de distribución de CSS relacionada con procesos hidrogeomorfológicos: blindaje superficial como control*

El marco conceptual en el que interpretamos los patrones y su relación con procesos hidrogeomorfológicos relacionados con el flujo superficial es el propuesto por Kirkby (1996) (Figura 3.1.11) donde se identifican los ciclos que conducen a la erosión y degradación del suelo y cómo se relacionan entre ellos en clave de funcionamiento dinámico del suelo (ver apartado de *Interacciones hidro-geomorfológicas* de la Introducción, Figura 1.8). Se trata de la identificación de procesos en función de la interacción de unas variables de estado (componentes de los ciclos de retroalimentación) y de sus umbrales de respuesta, que muestran una dinámica no-lineal. Esta conceptualización se establece a nivel de parche o *stand*, como mecanismos de respuesta y evolución *in situ*. Aquí se trata de trasladarlos a la escala de ladera, en un sentido de identificar interacciones globales a lo largo de todo el *continuum* del transecto.

Así, la evaluación de la superficie en términos de resistencia a la escorrentía y la erosión depende simultáneamente de la propia condición de las tres fases del suelo representativas de cada uno de los bucles de retroalimentación (Figura 3.1.11): (i) la **proporción de cobertura de vegetación**, representando los sumideros netos de escorrentía y elemento de protección casi total frente a la movilización de sedimento; (ii) la **profundidad del suelo** como limitante del potencial de almacenamiento de agua en el perfil, así como de la disponibilidad de material incorporable en la dinámica del sistema (remoción de sedimento y fuente de fragmentos rocosos) y (iii) el grado de **protección de la superficie no-vegetada** ejercido por la pedregosidad superficial (blindaje superficial). Cada una de estas variables de estado es traducible en términos de CSS, pudiendo así cuantificar cada una de las tres facetas.

La distribución de la **profundidad del suelo** es muy variable en el espacio, y ofrece una gran dificultad de medida. Así se toman los **afloramientos rocosos** como variable *proxy* de la profundidad del suelo, que nos informa sobre las áreas donde ya se ha producido un agotamiento del perfil de suelo por procesos de erosión.

Respecto al grado de **blindaje superficial** de la fracción no-vegetada, se simplifica al binomio *presencia-ausencia*, en la que los diferentes CSS se clasifican en una u otra categoría en función de su eficiencia en los procesos de infiltración y remoción de sedimento (Kirkby, 2002), donde % de cobertura y posición de los FR son las dos variables determinantes. Así, únicamente se consideran superficies con *blindaje efectivo* las áreas con intervalos de cobertura superior al 25% y con una posición relativa en superficie (i.e. 50FRsup y 75FRsup) quedando el resto de tipologías de CSS con pedregosidad en la categoría de ausencia de blindaje (i.e. 25FRsup y todos los intervalos de RF embebidos).

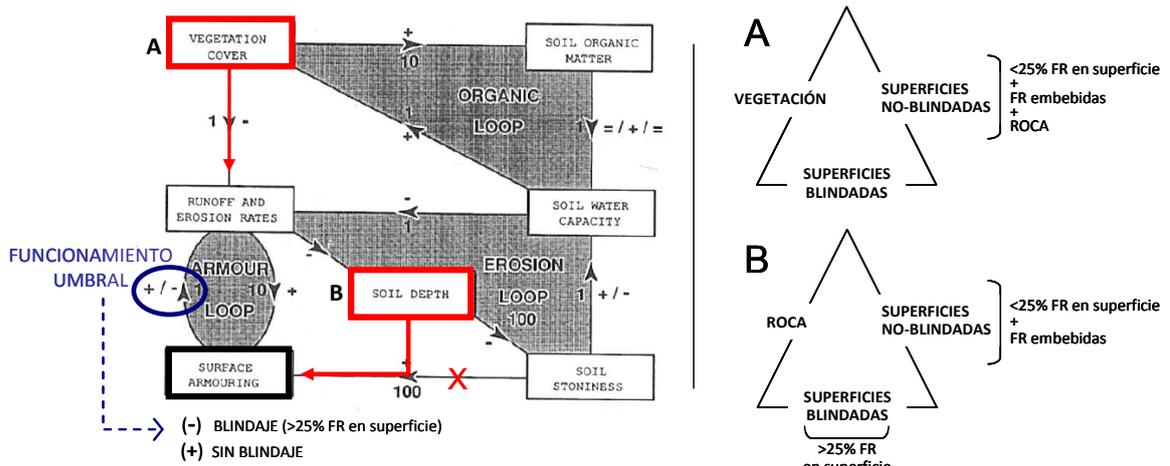


Figura 3.1.11 Marco metodológico para la interpretación de procesos en clave de blindaje superficial según Kirkby (1996) (Izda.) con los diagramas triangulares para la evaluación de la composición interna de las laderas (Dcha). Las letras A y B se representan en ambos lados, estableciendo la correspondencia entre ambas figuras.

En el estudio del blindaje superficial, la primera cuestión que analizamos es **la composición interna** en el seno de las diferentes laderas. Se aborda con la técnica de triángulos de composición o diagrama triangular con tres ejes o dimensiones que integran el todo (100% del fenómeno en cuestión). Se establecen dos niveles de desagregación: (i) por un lado considerando el ciclo de retroalimentación orgánico o biótico (Figura 3.1.11-A), cuya aportación se mide por el total de cobertura de la fase biótica (vegetación y materia seca), y (ii) por otro lado el ciclo de erosión (Figura 3.1.11-B), en el que la variable *proxy* que manifiesta el estado de profundidad de suelo es la cobertura de afloramientos rocosos.

Siempre se confrontan los dos estados de blindaje superficial puesto que es el ciclo de retroalimentación que regula los otros dos ciclos, el biótico u orgánico y el de erosión.

De este modo se pretende un diagnóstico global del grado de blindaje superficial a **escala de sitio**, si bien la inferencia de procesos requiere información sobre la distribución espacial a lo largo del transecto. La mera representación de las *series espaciales* de cada tipo de CSS (i.e. serie consecutiva de % de cobertura desde la divisoria hasta la parte baja del transecto) expresan la presencia de cada componente, sin aportar información sobre la interrelación con otros CSS. Por lo que para el análisis de ladera en términos de blindaje, se representan las agrupaciones funcionales de CSS en función de los diferentes ciclos de retroalimentación citados y así poder observar las relaciones de co-ocurrencia a lo largo del transecto (ver Figura 4.16 como ejemplo en el apartado 4.2.4.3 de resultados). Se exploran procesos relacionados a la distribución de CSS como son (i) el mecanismo de blindaje superficial; (ii) estimación de áreas de agotamiento del perfil de suelo y (iii) colonización de tipos funcionales de vegetación. Se apoya también en los resultados obtenidos en la fase de identificación de patrones periódicos en el análisis de series temporales.

3.2. MEDICIÓN DE LA ESCORRENTÍA Y MOVILIZACIÓN DE SEDIMENTOS

La obtención de datos empíricos de campo de los procesos de generación de escorrentía y movilización de sedimento es fundamental para los estadios posteriores de simulación y modelización como: (i) fuente de calibración y validación del modelo de simulación de escorrentía a escala de ladera para cada área de estudio y (ii) en una dimensión más conceptual, la comprensión de los procesos y mecanismos subyacentes que gobiernan la dinámica de generación de escorrentía y movilización de sedimentos a escala de ladera. Este segundo aspecto aspira al establecimiento de los umbrales de respuesta en cada uno de los ambientes considerados.

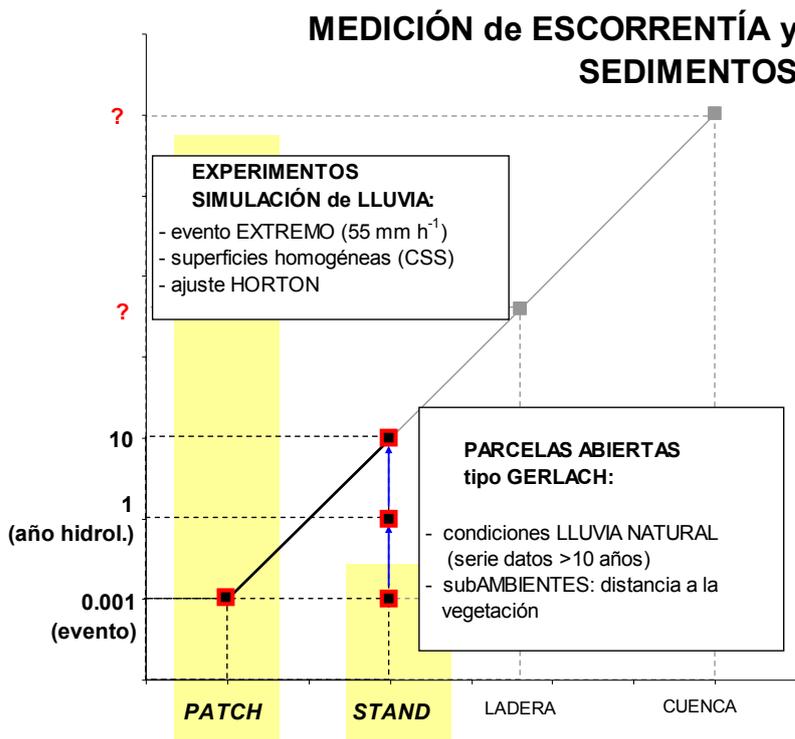


Figura 3.2.1 Jerarquía de las escalas de medida: objetivos y metodologías.

Se consideran dos escalas de medición en un modo jerárquico, micro-parcela y parcela (Figura 3.2.1). La escala inferior de micro-parcela (*path-scale*) pretende informar de la respuesta a la escorrentía de las unidades homogéneas de respuesta, que aquí denominamos componentes superficiales del suelo (CSS), en este caso bajo condiciones controladas de simulación de lluvia de un evento intenso.

En el nivel de escala superior, la escala de parcela (*stand-scale*), interesa la interdependencia entre diversos componentes superficiales en la manera en que naturalmente se organizan en el espacio. Esto es posible con la instalación de parcelas abiertas bajo condiciones de lluvia natural, las parcelas tipo Gerlach (Figura 3.2.1). Estos dos niveles de escala sirven para el propósito de *upscaling* para comprender mejor la respuesta hidrológica de la ladera.

3.2.1. Experimentos de simulación de lluvia en CSS: escala de micro-parcela.

La simulación de lluvia a escala de micro-parcela de cobertura homogénea es un método apropiado y extensamente probado en la caracterización de la variabilidad del comportamiento hidrológico de los componentes superficiales del suelo (CSS), que ha tenido un amplio uso y desarrollo desde la década de los '80, siendo todavía en la actualidad una herramienta utilizada. Es una metodología versátil de experimentación que permite la obtención del modelo de respuesta empírico *in situ* (*hidrograma de respuesta*). Sin embargo, presenta una limitación importante en cuanto al alcance de las interpretaciones de los procesos, restringiéndose al análisis de los procesos verticales de redistribución de agua del suelo, no siendo una herramienta válida para la escorrentía lateral subsuperficial, puesto que el experimento se desarrolla en una *isla de precipitación*.

Esta tesis ha utilizado resultados de experimentos de simulaciones de lluvia provenientes de bases de datos existentes de distintas zonas de estudio, todas de características semiáridas y utilizando la misma metodología de simulación. Así la mayor parte de los experimentos de simulación de lluvia disponibles corresponden a las mismas laderas de estudio de Benidorm (BE) y Cocoll (CC). Por otra parte, el análisis de la respuesta de superficies se ha apoyado también en datos de simulación disponibles de las áreas de Finestrat (FI, Alicante), Genovés (GE, Valencia) y Aguamarga (AM, Almería). Finestrat es una zona próxima situada a un kilómetro del área de estudio de Benidorm, con las mismas condiciones de litología, vegetación y suelos, aunque con una pendiente media ligeramente superior. Genovés (ver Cerdà, 1993), en la Serra Grossa, ha sido tomado como área comparable por litología y clima a Cocoll. Aguamarga pese a estar en un contexto climático más árido, presenta ciertas similitudes en cuanto al estado de blindaje superficial con respecto al área de Benidorm.

Se dispone de un total de 57 experimentos de simulación de lluvia, de las cuales 17 corresponden al área de estudio de Benidorm (Boix-Fayos, 2000); 18 al área de Cocoll (Boix-Fayos, 2000); 8 a Finestrat (Corell, 1998); 4 a Genovés (Cerdà, 1993) y 3 al área de Aguamarga (PREVEA, 2009). En todas las zonas se realizaron los experimentos de simulación de lluvia siguiendo el mismo protocolo y con el mismo instrumental (Figura 3.2.2).

Se utilizó el simulador de lluvia descrito en Calvo *et al.* (1988) y Cerda *et al.*, (1997) con boquillas HARDI-1553-10, con adaptador de gota gruesa, colocadas a una altura de 2 metros en la vertical del centro de la parcela, produciendo una intensidad de lluvia media de 55 mm h⁻¹. Con un tamaño aproximado de parcela de 0.24 m², con forma circular o asimilable, y con una duración del experimento de 60 minutos permitiendo así, en el caso de registrarse escorrentía, ser alcanzada la tasa de infiltración final estable (Figura 3.2.2). La escorrentía se midió a intervalos de 1 minuto y la concentración de sedimento en tres momentos del experimento: al comenzar la escorrentía, antes de que se alcanzara una tasa estable de escorrentía y al final del experimento, ya con tasas de escorrentía constantes. La humedad del suelo y la densidad aparente se determinaron por método gravimétrico antes y después de cada experimento a dos profundidades (0-3 y 3-6 cm). Los experimentos se realizaron en condiciones de suelo seco en verano. La selección de ambientes se realizó bajo criterios de representatividad intentando cubrir los principales microambientes dentro de cada ladera, aspecto clave para los objetivos del presente trabajo.

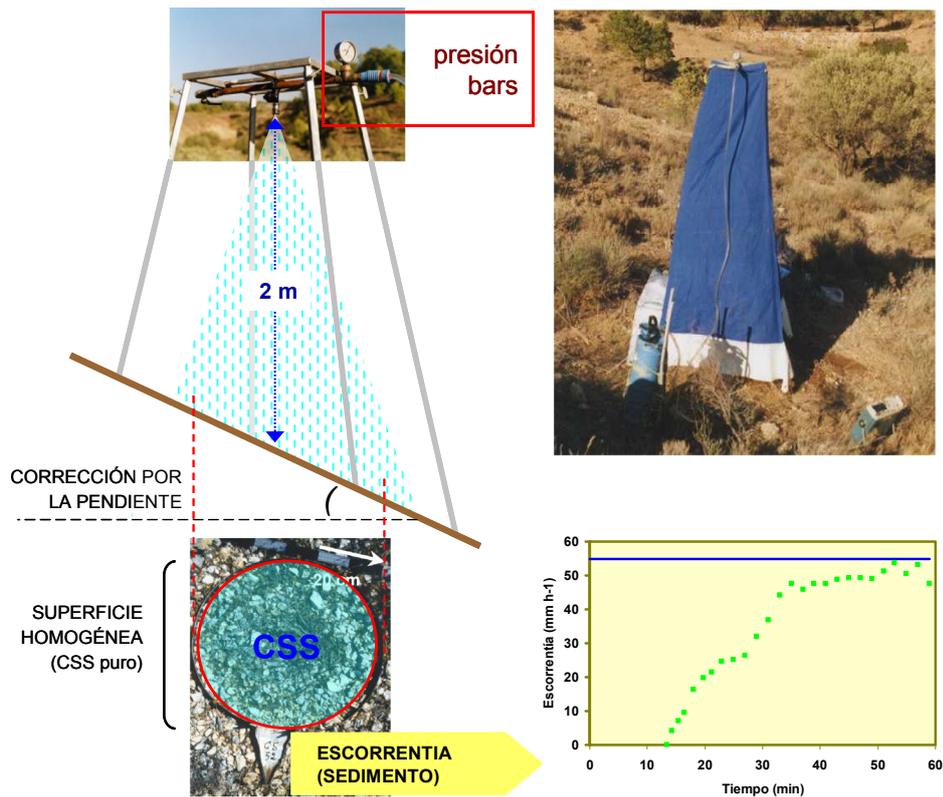


Figura 3.2.2 Síntesis metodológica de los experimentos de simulación de lluvia con el simulador descrito en Calvo *et al.* (1988).

3.2.2. Monitorización de la escorrentía y movilización de sedimentos en condiciones de lluvia natural: escala de parcela

La monitorización de la escorrentía y movilización de sedimentos bajo condiciones de lluvia natural mediante parcelas en campo es una práctica muy extendida, si bien existe una amplia diversidad de criterios y metodologías de implementación según los objetivos concretos.

Para ambas zonas de estudio, BE y CC, se dispone de un periodo de seguimiento de 13 años (1996-2008), lo que proporciona un registro amplio de la dinámica de los procesos bajo un variado rango de tipologías de eventos de precipitación. A ello hay que añadir el hecho de que a lo largo de todo el período se experimentaron en algunos frentes de parcela (área próxima al colector) cambios muy significativos en las características de la cobertura, proporcionando además una valiosa información respecto de la dinámica natural de cambio superficial y los cambios de respuesta asociados a ella.

3.2.2.1. Instrumentación y colección de datos

La monitorización de la escorrentía y movilización de sedimentos en ambas zonas de estudio se realiza en la ladera de exposición sur, distribuyendo las parcelas entre la parte media y media-alta del transecto de ladera (Figura 3.2.3).

La mayor parte de las instalaciones relacionadas con las parcelas de escorrentía se realizó en el marco del proyecto ERMES II (1996-1998) (ENV4-CT95-0181) en Cocoll y Benidorm. Posteriormente, y bajo los objetivos marcados en el proyecto SENSI (2000-2003) (AMB99-1246), se llevó a cabo una ampliación de instalaciones en el área de Cocoll, aumentando el número de parcelas de escorrentía y sedimentos.

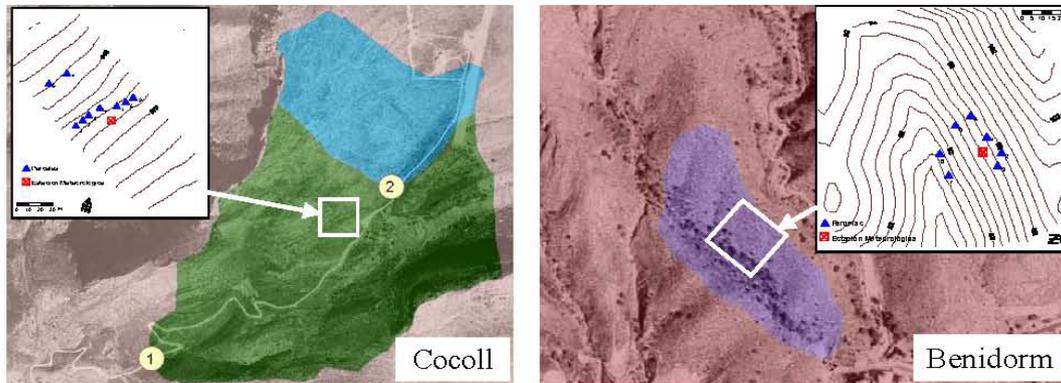


Figura 3.2.3 Situación de las parcelas y estaciones meteorológicas y de aforos (1 y 2, los datos provenientes de aforos no han sido utilizados en esta tesis) en Cocoll y Benidorm.

Datos meteorológicos.

En cada zona de estudio se instaló una estación meteorológica en la parte media de una ladera de exposición Sur en las proximidades de las parcelas de erosión (ver Figura 3.2.3). Estas estaciones están dotadas de un pluviógrafo Casella de 0.2 mm de resolución y un sensor de temperatura del aire, con un intervalo de registro de 10 minutos (30 min. al comienzo de la serie en 1996). El almacenamiento de los datos se realiza mediante dataloggers Unidata Starlog 7000 alimentados por pilas y con el soporte de una placa fotovoltaica en el caso de Cocoll. La descarga de los datos se realizó en el campo de forma periódica.

Escorrentía y producción de sedimentos: escala de parcela.

En agosto de 1996 se instalaron en las laderas sur de Benidorm y Cocoll una serie de parcelas de tipo Gerlach (Gerlach, 1967), de 50 cm de ancho del colector (Figura 3.2.4). Se optó por la modalidad de parcelas abiertas sin ningún tipo de delimitación con el propósito de obtener un registro de escorrentía y sedimentos con la máxima continuidad espacial de los procesos aguas arriba del colector. Los criterios de selección de las parcelas se basaron en diferentes coberturas de vegetación y pedregosidad, además de situar los colectores a diferentes distancias ladera abajo de espacios con diferentes propiedades superficiales y de cobertura, en especial diferentes distancias a la vegetación que supone variaciones en las distancias de flujo potencial (Tabla 3.2.1).



Figura 3.2.4 Ejemplos de parcelas Gerlach de erosión en Cocoll y Benidorm.

Tabla 3.2.1 Disponibilidad de parcelas GERLACH según los criterios fundamentales de (i) distancia a la vegetación del colector (i.e. longitud de flujo) y (ii) la tipología de vegetación.

		DISTANCIA PLANTA = LONGITUD FLUJO		
		VEG.	VEG.	VEG.
BES	<i>Stipa t.</i>	BE03	BE01	BE02 ^a BE06
	<i>Brachypodium r.</i>	BE05	BE07	
	Arbusto	BE04 BE02 ^a		
CCS	Arbusto	CC02 ^b CC05 CC08	CC01 CC02 ^b CC09	CC06 CC07
	Muerta	CC04	CC03	

(^a) Parcela a la que le ha crecido un arbusto justo en las proximidades del colector durante el periodo de colección.

(^b) Parcela con un *Cistus* en las proximidades del colector, pero que presenta el verdadero efecto barrera a distancias intermedias.

Cada parcela consta de una superficie de fibra de vidrio impermeabilizada y adherida al suelo con resina epoxi que dirige la escorrentía al colector y una tapa de madera de tablero fenolítico que protege de la lluvia directa (Figura 3.2.4). Este sistema permite una completa adaptabilidad a la superficie del suelo, permitiendo a su vez un sellado eficiente en la transición de la superficie del suelo con la solapa de recogida de agua y sedimentos que evite fugas por filtrado preferente en esa frontera. El excedente de agua de escorrentía que no cabe en el colector queda almacenado en depósitos de 30 litros, que conectados mediante mangueras se situaban en el recinto vallado de la estación meteorológica (Figura 3.2.5). Las parcelas que registraban los mayores volúmenes de escorrentía tenían en el depósito correspondiente un sensor de nivel de agua en registro continuo conectado a un datalogger y un vertedero en V para calcular el volumen total de escorrentía (ver Figura 3.2.5). El sistema utilizado permite la decantación de sedimentos de la escorrentía en el colector sin ser transmitidos a los depósitos.

En Cocoll se instalaron un total de nueve parcelas instaladas, cinco desde agosto de 1996, y el resto desde agosto del 2000. Las parcelas se instalaron en la parte media y alta de la ladera y drenan diferentes microambientes identificados en la ladera. Las parcelas CC04 y CC05 están situadas en la parte alta de la ladera y sus áreas contribuyentes tienen un elevado porcentaje de cobertura vegetal (100% en CC04 y más del 98 % en CC05) así como un mayor espesor de suelo. El resto de parcelas están situadas a media ladera y sus porcentajes de cobertura vegetal varían entre el 70 y el 14 %, diferenciándose además en la distribución de tipologías de superficies desnudas (pedregosidad, afloramiento rocoso, etc.) (Tabla 3.2.2).



Figura 3.2.5 Recintos de las estaciones meteorológicas en Benidorm y Cocoll, observándose los depósitos de escorrentía en momentos de desborde de los colectores.

En Benidorm se instalaron, con idénticos criterios y métodos, siete parcelas en agosto de 1996, de las cuales dos dejaron de estar operativas en marzo de 2000 (parcelas BE05 y BE07, por vandalismo). Las parcelas son representativas del espectro de propiedades superficiales que se da en la ladera. En este caso, con una vegetación marcadamente dominada por *Macrochloa tenacissima*, la variedad entre parcelas viene definida principalmente por las distancias y pasillos entre macollas de esparto (Tabla 3.2.3).

Tabla 3.2.2 Características de las parcelas de erosión y porcentajes de cobertura en Cocoll (V: Vegetación; H: Hojarasca; P: Pedregosidad; S.D.: Suelo desnudo; R: Roca).

	Características	V	H	>50% P	<50% P	S.D.	R
CC01	Parte media de la ladera. Cobertura de <i>Rosmarinus</i> y <i>Cistus</i> . Cubierta pedregosa en contacto con la entrada de la parcela.	46.59	4.60	38.43	6.71	3.67	0.00
CC02	Parte media de la ladera. Cobertura de <i>Cistus</i> , <i>Rosmarinus</i> y <i>Thymus</i> , vegetación y hojarasca en la boca de la parcela.	78.47	4.54	15.97	0.63	0.39	0.00
CC03	Parte media de la ladera. Cobertura de <i>Ulex parviflorus</i> muerto. La vegetación muerta se halla situada a 50 cm de la entrada de la parcela	70.68	23.49	1.37	0.00	4.46	0.00
CC04	Parte alta de la ladera 100% de cubierta de <i>Ulex parviflorus</i> , muerta recientemente la mayor parte de ella.	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
CC05	Parte alta de la ladera, cobertura de <i>Rosmarinus</i> , franja pedregosa en la boca de la parcela.	98.24	0.00	1.76	0.00	0.00	0.00
CC06	Parte media de la ladera, desprovista de vegetación en la parte próxima al colector, <i>Cistus</i> y alta pedregosidad. El afloramiento de roca se da en la parte superior.	14.40	2.41	55.13	18.47	5.23	4.37
CC07	Parte media de la ladera, cobertura de <i>Rosmarinus</i> y <i>Cistus</i> . Vegetación a 50 cm. del colector.	60.21	9.35	13.39	14.45	2.60	0.00
CC08	Parte media de la ladera, cobertura de <i>Rosmarinus</i> y <i>Thymus</i> . Vegetación en la entrada del colector	65.29	7.75	18.85	7.75	0.37	0.00
CC09	Parte media de la ladera. Desprovista de vegetación hasta los 30 cm. desde el colector. Cubierta de <i>Cistus</i> y <i>Rosmarinus</i> .	41.31	3.98	43.08	11.63	0.00	0.00

Tabla 3.2.3 Características de las parcelas de erosión y porcentajes de cobertura en Benidorm (V: Vegetación; H: Hojarasca; P: Pedregosidad; S.D.: Suelo desnudo; R: Roca).

	Características	V	H	>50% P	<50% P	S.D.	R
BE01	Parte media de la ladera. Macolla de <i>Stipa</i> a 1 m. del colector.	38.27	0.90	30.31	21.66	7.71	1.16
BE02	Parte media de la ladera, aparición de <i>Anthyllis cytisoides</i> junto al colector. <i>Stipa</i> en parte alta.	28.94	0.00	34.59	3.69	32.78	0.00
BE03	Parte media de la ladera, <i>Stipa</i> hasta 1.5 m.	61.24	5.38	14.22	15.49	2.82	0.85
BE04	Parte media de la ladera, cubierta dispersa de <i>Anthyllis cytisoides</i> y <i>Brachypodium retusum</i> . Pedregosidad junto al colector.	59.44	3.61	28.81	6.51	1.62	0.00
BE05	Parte media-baja de la ladera, <i>Anthyllis cytisoides</i> y <i>Brachypodium retusum</i> . Franja pedregosa de unos 20 cm. junto al colector.	77.79	0.00	4.33	17.87	0.00	0.00
BE06	Parte baja de la ladera, escasa cubierta vegetal, sólo <i>Stipa</i> .	12.39	2.42	56.22	0.00	28.97	0.00
BE07	Parte baja de la ladera, primera franja de vegetación de 20 cm.	63.03	0.73	18.99	13.71	3.54	0.00

La limpieza y recogida de escorrentía y sedimento de las parcelas se realizó tras cada evento de precipitación y en su defecto, de forma regular con una frecuencia mínima mensual (Figura 3.2.6). En este sentido, la consideración de evento queda en sentido laxo, pudiéndose incluir en una tanda de colección de muestra una serie de varios eventos consecutivos en el tiempo.

Los sedimentos y la escorrentía recogidos fueron separados y medidos en el laboratorio. Respecto a la fracción sólida, se diferenciaron tres clases: (i) Sedimento fino (menor de 2 mm de diámetro); (ii) sedimento grueso (mayor de 2 mm de diámetro) y hojarasca (fragmentos de vegetación no considerados en las tasas de transporte). El sedimento en su fracción gruesa se subdivide a su vez en tres fracciones: 2-5 mm; 5-10 mm y >10 mm, por el interés genérico de diferenciar la movilización de fragmentos rocosos.

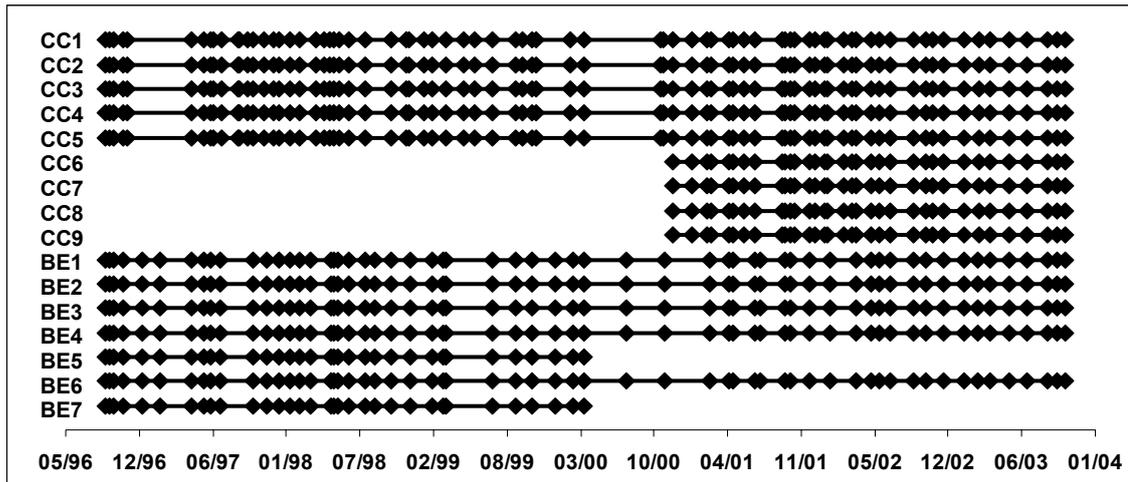


Figura 3.2.6 Distribución temporal de los periodos de colección (1996-2003) de las parcelas. Quedan excluidos aquellos en los que los valores de precipitación son < 1 mm.

3.2.2.2. *Análisis de la serie histórica de datos*

La serie de datos completa en ambas zonas de estudio es de 13 años (1996 a 2008), si bien en el capítulo 6 donde se analiza de manera monográfica la respuesta de la escorrentía y los sedimentos sólo se utiliza hasta el año 2003. Esto se debe a que ese capítulo se basa en un trabajo elaborado en 2004 y publicado en 2005:

Calvo-Cases, A., Boix-Fayos, C., Arnau-Rosalen, E., 2005. Patterns and thresholds of runoff generation and sediment transport on some Mediterranean hillslopes. En: Garcia, C. y Batalla, R. J. (Eds.), *Catchment Dynamics and River Processes: Mediterranean and Other Climate Regions*. Elsevier, Amsterdam, 31 – 51.

Sin embargo se siguió con la toma de datos, los cuales sí se incorporan en la determinación de umbrales de respuesta a la escorrentía realizado ya en el capítulo 7, de modelización de la escorrentía a escala de ladera a modo de calibración. No se ha considerado necesario actualizar y reelaborar los análisis para el caso del capítulo 6 por haberse visto cubiertos los objetivos de dicho apartado, sin que la incorporación de más serie de datos constituyese un cambio sustancial en los resultados.

La precipitación se caracteriza en términos generales de magnitud, frecuencia e intensidad en función del área de estudio. Estos parámetros están influenciados por la orografía local, la altitud y la distancia al mar, por lo que cabe esperar diferencias significativas entre ambas áreas de estudio, más allá del mero gradiente ya establecido en función de la media anual de precipitación y temperatura.

La circunstancia de que las parcelas sean de tipo abierto hace que no exista referencia explícita al área drenante directamente al colector como sucede en las parcelas de cerradas y delimitadas. Esto no hace posible el cálculo de tasas de escorrentía y erosión en las que el flujo de agua y sedimentos se referencie a un área determinada. Alternativamente, nos referimos a las magnitudes de tránsito

de escorrentía y sedimentos por metro lineal ($l\ m^{-1}$ y $g\ m^{-1}$ respectivamente) en unas condiciones naturales de conectividad de flujo aguas arriba del colector sin interferencias instrumentales.

En el análisis de las variables de escorrentía y sedimentos, se combina la distribución de componentes superficiales del suelo aguas arriba del colector, con especial relevancia a los primeros 3 m. Esta consideración engloba una distancia de influencia suficiente en términos de los procesos estudiados. En el análisis de toda la serie temporal de datos se trata así mismo de considerar los posibles cambios en las condiciones de cobertura de cada parcela, que si bien no se dispone de una serie de fotografías sistemáticas, sí existe una rigurosa descripción y fotografías en el momento de la instalación de las parcelas.

Se ha calculado una serie de coeficientes de correlación entre los porcentajes de cobertura de los componentes superficiales del suelo anidados a intervalos de 10 cm (hasta los 300 cm ladera arriba del colector), y el total de producción de sedimento recogido en cada parcela. El propósito es analizar la influencia de la distancia (o tamaño de patrón) de los diferentes componentes superficiales del suelo en la producción de sedimentos en cada parcela. Los valores del coeficiente de correlación han sido representados contra la distancia desde el colector para mostrar cómo el porcentaje de cada componente se correlaciona con la fracción fina, gruesa y el total de sedimentos respectivamente (Calvo *et al.*, 2005).

3.3. RESPUESTA HIDROLÓGICA DE COMPONENTES SUPERFICIALES DEL SUELO (CSS).

La caracterización de la respuesta hidrológica de los CSS se llevó a cabo en tres pasos, descritos en la Figura 3.3.1: (i) se analizó la respuesta hidrológica en microparcels en campo mediante simulaciones de lluvia (escala jerárquica más baja *patch scale*); (ii) esa respuesta hidrológica se asoció a los componentes superficiales del suelo cartografiadas en campo y finalmente (iii) se obtuvo un *hidrograma tipo* para cada uno de los CSS de la leyenda de la cartografía y para cada una de las áreas de estudio (Figura 3.3.1), a partir de datos empíricos de experimentos de simulación de lluvia de los que se disponía de anteriores proyectos.



Figura 3.3.1 Metodología general de caracterización de la respuesta hidrológica de componentes superficiales del suelo.

Sin embargo en algunos casos se carecía de resultados de simulaciones de lluvia para algún tipo de CSS cartografiado. Ante esta **carencia** se desarrolló un protocolo de asignación de la respuesta en los casos de no disponibilidad (Figura 3.3.1). Este ejercicio de asignación se apoyó en la comprensión de los mecanismos y factores que intervienen en la respuesta, ampliando al uso de bases de datos, fuera de las zonas concretas de estudio de esta tesis (Benidorm y Cocoll) y utilizó datos de otras simulaciones de lluvia realizadas con la misma metodología en áreas de condiciones ambientales similares (distintas laderas de Valencia, Alicante y Almería, ver apartado 3.2.1) (Figura 3.3.1).

3.3.1. Sistema de Análisis de datos experimentales de simulación de lluvia

El sistema de análisis está adaptado a la disponibilidad de parcelas de simulación de lluvia, tanto en lo referente a la variedad de CSS como a la disponibilidad de datos para cada zona de estudio. El principal criterio fue el efecto producido por los CSS en la respuesta hidrológica, aunque el interés también se dirigió hacia las variaciones entre sitios. Todo ello se apoyó en conceptos generados a partir del uso generalizado de microparcels para simulación de lluvia especialmente de la década de los '90, ampliamente disponible en la bibliografía.

En la Figura 3.3.2 se desglosa los tres bloques de los que se compone el Sistema de Análisis de las simulaciones de lluvia con el objeto de proporcionar información sobre los mecanismos y factores que influyen la respuesta en función del tipo de CSS y del área de estudio: (i) relación de disponibilidad de RFS; (ii) extracción de los parámetros y (iii) el análisis de las relaciones entre la respuesta y los factores considerados.

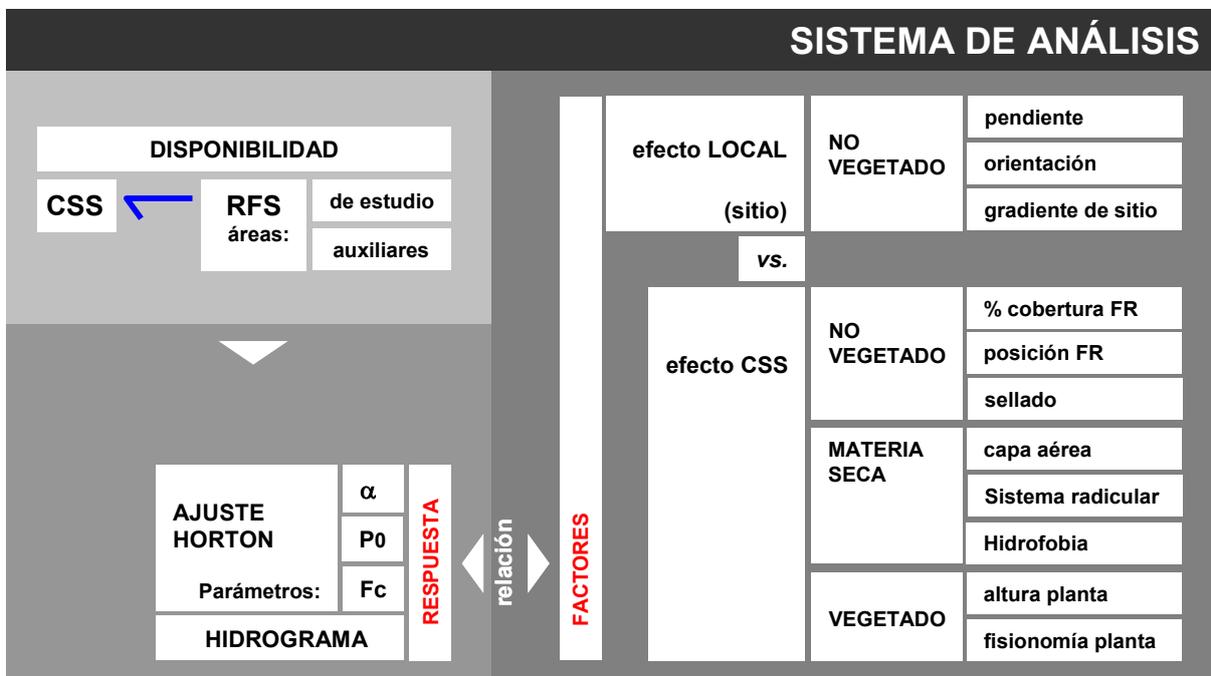


Figura 3.3.2 Metodología general del Sistema de Análisis de la respuesta hidrológica de componentes superficiales del suelo (CSS). RFS: parcelas de simulación de lluvia; FR: fragmentos rocosos.

3.3.1.1. Disponibilidad de experimentos de simulación de lluvia (RFS)

Se realizó una tipificación precisa de las parcelas de simulación de lluvia (RFS) disponibles (Tabla 3.3.1) en base a los diferentes CSS a partir de fotografías y su descripción *in situ* en el momento de los experimentos de simulación. De esta manera cada parcela se describió en función de su cobertura vegetal (% de coberturas, altura de la vegetación); diferentes rangos de cobertura y posición de fragmentos rocosos; presencia o ausencia de costra mineral y afloramientos de roca madre.

Se seleccionaron aquellas parcelas de RFS de cobertura homogénea que se ajustaron a las clases de cartografía de CSS, tanto de las simulaciones del área de estudio como de las auxiliares. El disponibilidad final de RFS para la fase de análisis se presenta en la Tabla 3.3.1.

Aunque en determinados momentos del análisis del efecto LOCAL se consideró oportuno el uso de parcelas con mezcla de CSS, que aunque no cubrían el requisito de análisis de la respuesta de los CSS, si aportan testimonio del comportamiento de la escorrentía a nivel de sitio.

Tabla 3.3.1 Síntesis de disponibilidad y carencia de experimentos de simulación de lluvia por tipo de superficie (CSS) y área de estudio. BE: Benidorm; CC: Cocoll; GE: Genovés; FI: Finestrat; AM: Agua Amarga; S: ladera de exposición Sur; N: ladera de exposición Norte.

		Áreas de estudio			Áreas auxiliares										
		Área		BE		CC		CC		GE		FI		AM	
		Orientación		S	N	S	S	N	N	S	S	N	S	N	
NO-VEGETADAS	Afloramiento roca madre														
	% Cobertura FR	<25%	Posición FR	En superficie											
				Embebida											
		25-70%	En superficie												
			Embebida												
		>70%	En superficie												
			Embebida												
	Hojarasca [BEN]														
	VEGETADAS	Plantas muertas [BES-CCS]													
		Herbáceas	<i>Stipa</i> [BE]												
<i>Brachypodium</i> [BE]															
Arbustos															
<i>Pinus halepensis</i>															

FR: Fragmentos rocosos
 DISPONIBILIDAD con al menos una simulación de lluvia por CSS
 NO-PRECISA. Clase no existente en el área de estudio. No precisa asignación
 CARENCIA de experimento de simulación de lluvia. Precisa asignación

3.3.1.2. Ajuste de la curva de RFS: extracción de los parámetros de Horton

Los datos brutos de las simulaciones de lluvia relativos al registro de volumen de escorrentía durante los experimentos (i.e. nube de puntos de medida) se ajustan por mínimos cuadrados a un modelo exponencial (Ecuación 1). Este modelo es una adaptación del de Horton (1933) para los datos procedentes de las simulaciones, asumiendo que la escorrentía es la inversa de la infiltración, la cual está en nuestro caso limitada por la intensidad de la lluvia en el comienzo de los experimentos. Se ha utilizado una aplicación escrita en QBASIC por R. García Bartual y A. Calvo Cases en los años 90, la cual obtiene el mejor ajuste por sucesivas iteraciones. Los parámetros P_0 , α y F_c son los utilizados para la comparación y análisis cuantitativo de las RFS.

$$E = (IP_r - F_c) * \left[1 - \exp\left(-\alpha * \left(T_i - 60 * \frac{P_0}{IP_r}\right)\right) \right] \quad (\text{Ecuación 5})$$

Donde:

E (mm h^{-1}) = Escorrentía

IP_r (mm h^{-1}) = Intensidad de la precipitación

F_c (mm h^{-1}) = Tasa de infiltración final estable, tasa de infiltración cuando T tiende a infinito

α = Índice de decaimiento de la tasa de infiltración según el modelo de Horton

T_i (min.) = Tiempo desde el inicio de la lluvia

P_0 (mm) = Precipitación umbral para la escorrentía ($P_0 = IP_r * T_0 / 60$)

T_0 (min) = Tiempo transcurrido hasta el inicio de la escorrentía

El parámetro P_0 , precipitación (mm) necesaria para que comience a producirse escorrentía hortoniana -en este caso la escorrentía en la salida de la parcela- estima la rapidez de respuesta de la escorrentía. Como la lluvia simulada es de intensidad constante, P_0 es proporcional al tiempo de retardo de la escorrentía, respecto del de inicio de la lluvia.

El parámetro α , es radio de la curva y representa la velocidad con que se alcanza la tasa de infiltración final estable (F_c) una vez ha comenzado la escorrentía.

El parámetro F_c , es la tasa de infiltración final estable (mm h^{-1}) que estima la capacidad de infiltración del suelo. Se define como la tasa constante o velocidad de infiltración y se caracteriza por un régimen relativamente estabilizado (asintótico) al que se llega a lo largo del tiempo cuando el agua ha saturado la superficie del suelo.

3.3.1.3. Análisis de la respuesta a la escorrentía: efecto LOCAL vs. efecto CSS

Partiendo del supuesto que en términos generales, son tres los grupos de factores que afectan la respuesta del suelo ante la lluvia: (i) el **efecto LOCAL** que ejercen las características litológicas, topográficas, climáticas y de historial de uso sobre las propiedades del suelo, y en su respuesta hidrológica; (ii) los diferentes **componentes superficiales del suelo (CSS)** que modulan el efecto local y (iii) la **humedad antecedente** del suelo.

El análisis de las simulaciones de lluvia (ver Figura 3.3.2) se centra en el efecto producido por los diferentes componentes superficiales del suelo (**efecto CSS**). También se considera el **efecto LOCAL** analizando los factores derivados de la topografía (i.e. pendiente y exposición) y se comparan las respuestas hidrológicas entre zonas de estudio. Además todas las simulaciones se realizaron en unas condiciones iniciales de suelo seco coincidiendo con el periodo estival, excluyendo así el efecto de la humedad antecedente.

El análisis del efecto de CSS se vincula directamente con la aproximación metodológica *proceso-patrón* explicado en la Figura 3.3.3. Las *propiedades superficiales* del suelo interactúan (flecha bidireccional) con los *procesos* que operan *in situ*, mediante los pertinentes mecanismos de retroalimentación. *Patrón* y *respuesta* son las manifestaciones de las *propiedades superficiales* (*formas*) y de los *procesos* respectivamente (Figura 3.3.3), ambos pudiendo ser cuantificados. El *patrón* en este caso corresponde a los propios CSS, como entidades definidas según la configuración espacial de los elementos presentes en el suelo. La *respuesta* a la escorrentía se identificó a partir de los resultados de los experimentos de simulación de lluvia. La *respuesta* a la escorrentía se identifica con los resultados de los experimentos de simulación de lluvia. Así pues, a partir del análisis de las relaciones de CSS y RFS se pretende inferir información tanto sobre las *propiedades superficiales* relevantes como de los *procesos* que operan en el mecanismo de generación de escorrentía.

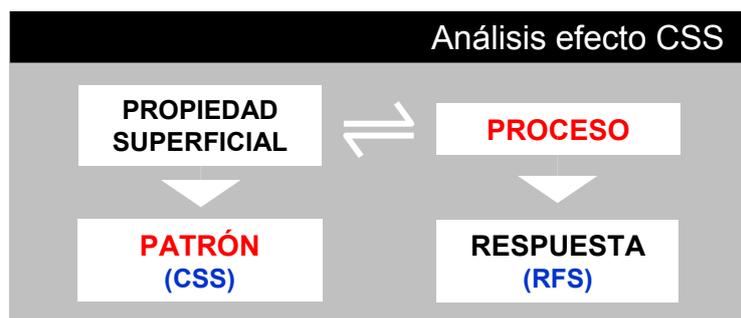


Figura 3.3.3 Marco conceptual de análisis del efecto de componentes superficiales del suelo (CSS) bajo la aproximación metodológica de *proceso-patrón*. RFS: experimentos de simulación de lluvia.

El análisis se realiza de manera independiente en tres subcategorías atendiendo a la diferente naturaleza de los CSS: (i) superficies no-vegetadas; (ii) material vegetal seco que corresponde con la hojarasca y plantas muertas y (iii) las superficies vegetadas.

El factor LOCAL sólo tiene sentido inspeccionarlo en la subcategoría de superficies no-vegetadas (Figura 3.3.2), puesto que el efecto de CSS mantiene un papel modulador en la respuesta general del sitio pudiéndose llegar a identificar ese factor. Sin embargo, el efecto preponderante de la vegetación es tal que llega a enmascarar la componente local de la respuesta. Respecto de la subcategoría de material seco, la única parcela de RFS disponible para el caso de la hojarasca se incluye en el análisis LOCAL de las no-vegetadas.

(i) Análisis de superficies NO-VEGETADAS

Esta es la subcategoría de CSS que presenta una mayor complejidad de análisis., Corresponde con la fracción de cobertura del suelo más activa en cuanto a los procesos implicados en los flujos superficiales de agua y sedimentos. Su complejidad se debe de la gran diversidad de tipos de CSS que presenta, resultado de la elevada heterogeneidad espacial en su distribución superficial característica de estos ambientes mediterráneos. Así pues, la caracterización y comprensión de la respuesta de la fracción no-vegetada de la superficie es un apartado clave en los objetivos generales de esta tesis.

El **efecto LOCAL** se aborda analizando el gradiente de pendiente; el contraste micro-climático debido a la exposición de la ladera (Norte vs. Sur) y el gradiente de sitio, el cual aglutina el carácter local de cada ladera (Figura 3.3.2). La influencia de la pendiente es el único caso en que puede cuantificarse las relaciones con la respuesta, y que se inspecciona para los tres parámetros de Horton (P_0 , α y F_c). En los otros dos casos se observa el comportamiento de las capacidades de infiltración (parámetro F_c) en los gradientes resultantes entre sitios.

El análisis completo del **efecto de CSS** se sintetiza en la Figura 3.3.4 sujeto al marco conceptual definido en la Figura 3.3.3 y que se subdivide en cuatro subapartados que consiguen articular un flujo de trabajo que avanza progresivamente en la descomposición y comprensión de la respuesta a la escorrentía.

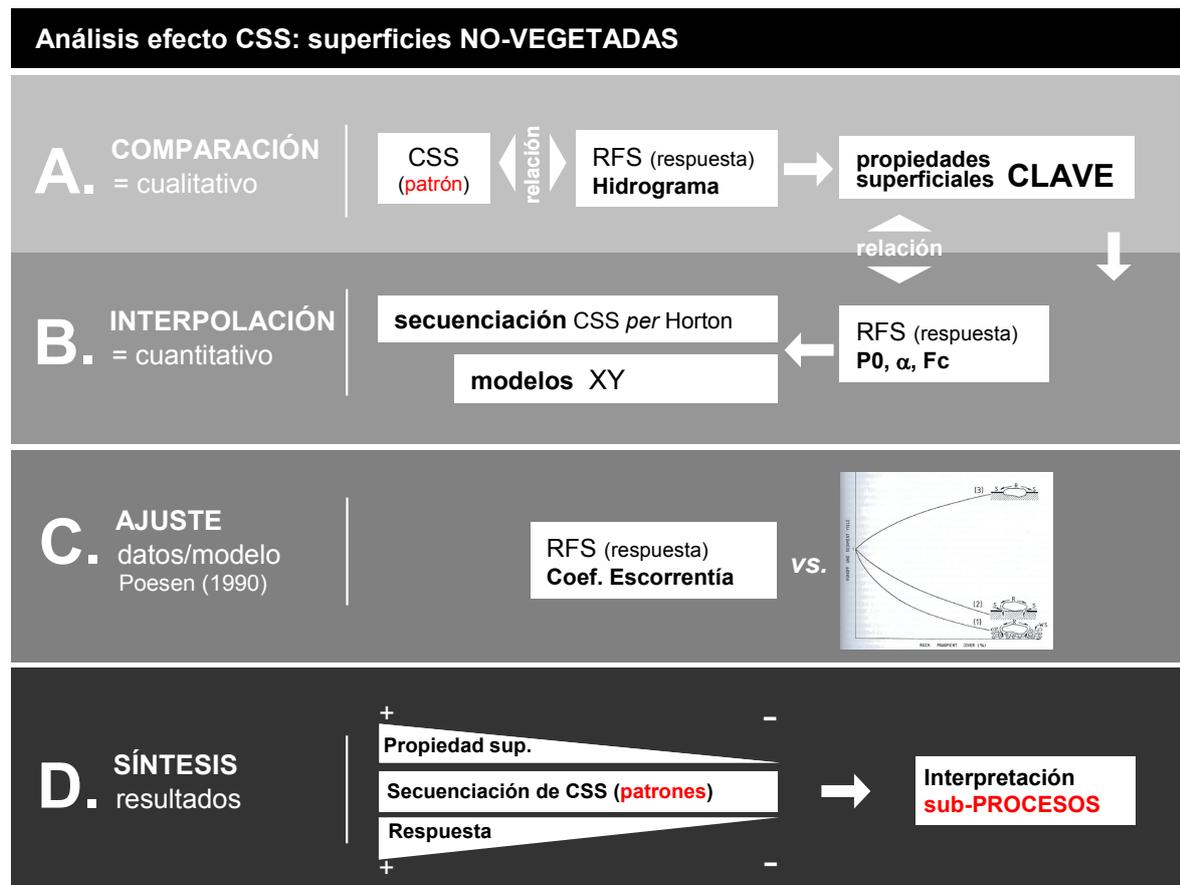


Figura 3.3.4 Desglose metodológico del análisis del efecto CSS para las superficies no vegetadas. RFS: parcelas de simulación de lluvia.

a. Análisis comparativo de curvas de RFS

En una primera aproximación todavía cualitativa se comparan las curvas de escorrentía o hidrogramas provenientes del ajuste de las simulaciones de lluvia (RFS), con el objeto de determinar las *propiedades superficiales* clave que modulan a nivel de CSS la dinámica de la respuesta (Figura 3.3.4a).

La comparación se fundamenta en las variaciones o cambios de las características de los respectivos CSS a los que representa cada parcela de simulación. Las diferentes posibilidades de comparación vienen determinadas por la propia disponibilidad de RFS y se esquematizan en la Figura 3.3.5 y son referentes a los cambios en cobertura, posición y tamaño de los fragmentos rocosos (FR) y al cambio de tipología de sellado superficial (dinámico vs. estático). Son dos las clases de sellado superficial que se consideran: (i) el perteneciente a la costra mineral fina resultado de la disgregación de partículas por el impacto de las gotas de lluvia en la superficie (*splash*) y que denominamos *sellado dinámico* y (ii) el *sellado estático*, resultante del blindaje superficial ejercido de una elevada pedregosidad, especialmente la embebida.

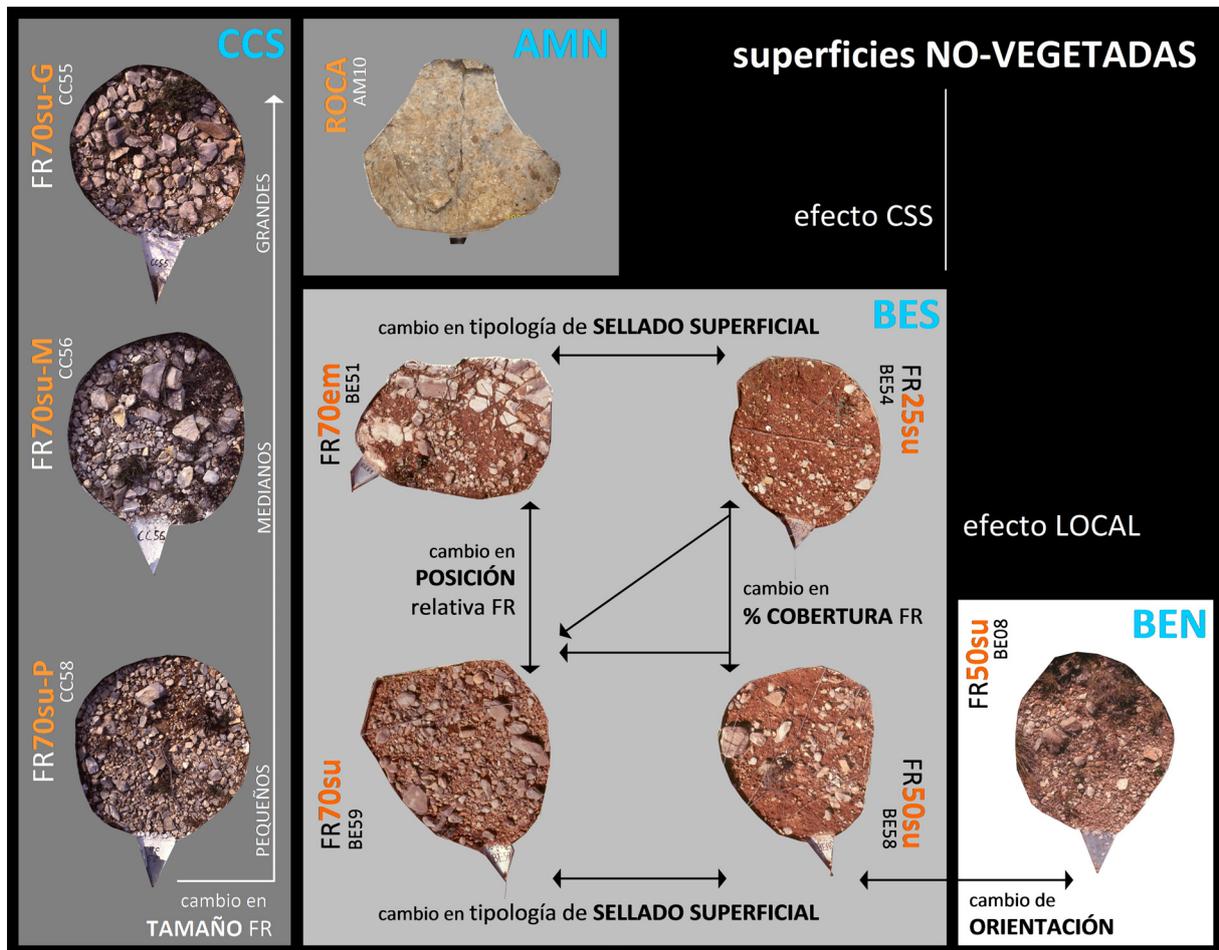


Figura 3.3.5 Diagrama de variación de las características superficiales de las parcelas no vegetadas para la fase analítica de comparación cualitativa de curvas de escorrentía.

La comparación de curvas debe realizarse entre parcelas de una misma ladera para eliminar las variaciones debidas al factor LOCAL, y en este sentido, el área en la que disponemos de más posibilidades de análisis es Benidorm Sur (BES) que reúne parcelas con diferentes porcentajes de cobertura y posición de FR y con presencia de costra mineral en la fracción de suelo desnudo (Figura 3.3.5). Se incluye además la comparación de curvas de la clase FR50su en ambas laderas de BE de exposición contrastada, que sirve para verificar el efecto CSS en cuestión, el cual se sobrepone a la influencia LOCAL respectiva de cada sitio (Figura 3.3.5). Para la clase ROCA se hace uso de la simulación disponible de Aguamarga (AM10), y cuya respuesta se considera perfectamente extrapolable al resto de sitios por su propia naturaleza.

De manera complementaria, y aunque el tamaño de los fragmentos rocosos no se haya considerado en la leyenda de la cartografía, se compara este efecto de los FR en parcelas del área de Cocoll (Figura 3.3.5).

b. Modelos de interpolación de la respuesta (parámetros de Horton) a partir de propiedades superficiales clave

Se pretende corroborar cuantitativamente con los datos disponibles en todas las áreas los resultados de las observaciones anteriores, basadas en la comparación de curvas de un único sitio. Por un lado, tiene por objeto (i) obtener las *secuenciaci*ones de todo el rango de CSS según los gradientes de respuesta de cada parámetro de Horton (Figura 3.3.4b), a fin de dilucidar los sub-procesos que operan a nivel superficial en base a las propiedades de los CSS (Figura 3.3.4d). Por otro lado, se pretende (ii) obtener modelos de respuesta a partir de las *propiedades superficiales clave* que permitan la interpolación de los valores de los parámetros de Horton en la fase posterior de asignación (Figura 3.3.4b).

Para el primer objetivo se ordenan los diferentes CSS en tres gradientes según la propiedad superficial que se ha identificado clave en la respuesta para cada uno de los tres parámetros de Horton. Puesto que estas propiedades superficiales (como la rugosidad) no están cuantificadas mediante otros procedimientos, estos gradientes se establecen con el apoyo de las simulaciones de BES y FI, de donde se dispone de mayor rango simulaciones de CSS no-vegetados.

Para el segundo propósito de cuantificación de los modelos de respuesta se precisa la conversión de estos gradientes o *secuenciaci*ones de CSS en variables cuantitativas continuas. En el caso concreto de la rugosidad superficial –propiedad superficial que se identifica clave para el parámetro P0- se cuantifica en función de la pedregosidad, a partir del % de cobertura y posición de los FR. A partir del valor central del rango de cobertura de cada clase, se eleva o reduce el valor estimado de rugosidad según se trate de pedregosidad superficial o embebida respectivamente. Respecto de las propiedades para los otros dos parámetros, α y F_c , en las que no es posible un tipo de estimación cuantitativa directa como para la rugosidad, los gradientes de CSS se utilizan a modo de escalado semi-cuantitativo, cuya posición relativa de cada CSS en el gradiente determina la magnitud de la nueva variable. A pesar de que el valor que adquiere no tiene ninguna correspondencia con la magnitud física real. Así todas las propiedades superficiales pueden tratarse como una variable

cuantitativa para obtener las funciones de ajuste con los respectivos parámetros de Horton de las simulaciones de lluvia.

c. Ajuste de los datos de RFS al modelo conceptual de respuesta de FR de Poesen (1990)

A pesar de que se manejan datos de simulación de lluvia de diversos sitios, se considera oportuno testear la universalidad o generalidad de las pautas de respuesta observadas en el análisis confrontando nuestros datos frente al modelo conceptual de respuesta según cobertura y posición de fragmentos rocosos propuesto por Poesen (1990) (Figura 3.3.4c).

Este autor propone a partir de datos empíricos tres trayectorias en función de la posición de los FR (embebida o en superficie) y de la tendencia o no al sellado superficial del material fino (ver Figura 3.3.6). Los dos casos que nos interesan (i.e. posición embebida y en superficie sobre material susceptible de sellado durante el evento de precipitación) muestran trayectorias divergentes a medida que se incrementa la pedregosidad. En el caso de los FR en posición embebida, el aumento de cobertura produce un incremento en los coeficientes de escorrentía totales, caso contrario de lo que ocurre con los FR situados sobre la superficie. En este modelo se considera el coeficiente de escorrentía total, que es una resultante del comportamiento global del hidrograma, y por tanto, de los tres parámetros hasta ahora utilizados.

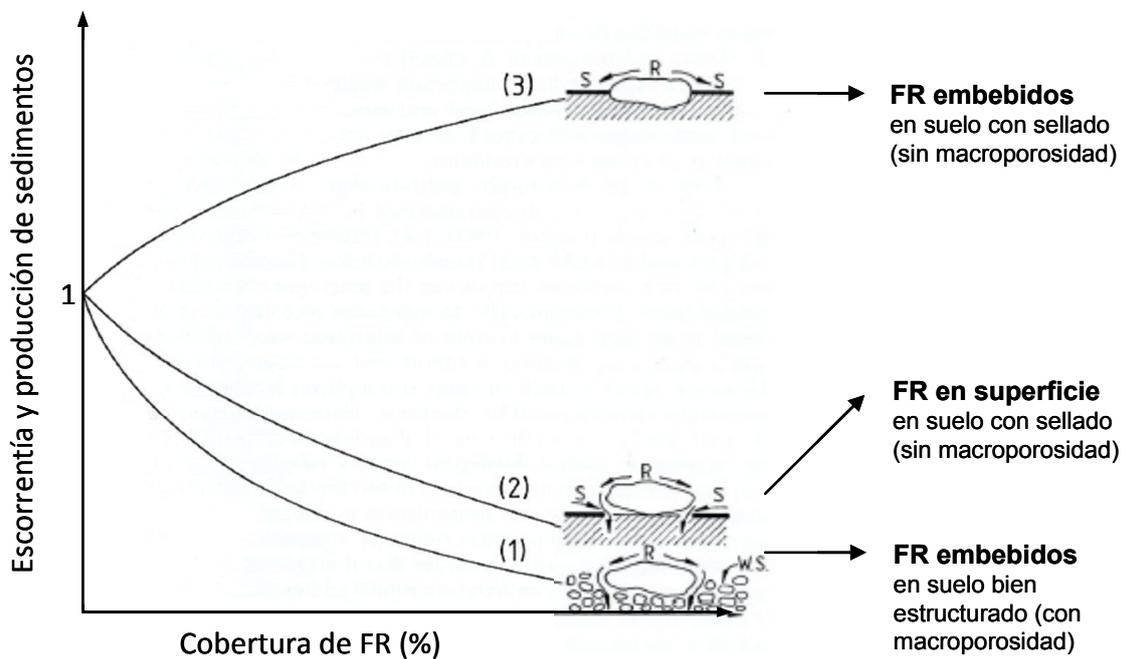


Figura 3.3.6 Modelo estructural de respuesta de Poesen (1990) que ilustra las relaciones obtenidas entre cobertura de FR y escorrentía y producción de sedimentos bajo diferentes situaciones: (1) FR embebidos en una superficie con macroporos; (2) FR en superficie en un suelo susceptible al sellado y (3) FR bien embebidos en una superficie sellada (sin presencia de macroporos). Resultados derivados de experimentos de simulación de lluvia bajo diferentes coberturas en suelos franco arenosos y franco limosos

Los datos de simulaciones susceptibles de ser utilizados para este propósito son los de las áreas de BES y FIS, de donde se dispone de mayor variedad de simulaciones, con representación de superficies con FR tanto en posición embebida y como en superficie.

(ii) Análisis de MATERIA SECA: hojarasca y plantas muertas

Este subapartado considera **tres tipos** de material vegetal seco, diferentes según el área de estudio bajo un criterio de abundancia y representatividad en cada ladera (Figura 3.3.7): (i) hojarasca para BEN; (ii) plantas anuales muertas para BES y (iii) matorrales muertos (*Ulex parviflorus*) en CCS. Estas clases llevan asociadas un diferente comportamiento frente a la escorrentía, derivado tanto de la propia morfología y situación general del material, como a los procesos asociados a su descomposición, en el que el fenómeno de la hidrofobia juega un papel fundamental.

La **disponibilidad de simulaciones** de lluvia se restringe a una parcela de hojarasca con presencia de restos de *Stipa* en el área auxiliar de FIS (parcela FI10), y otra parcela a una *Stipa* muerta en AMN. Complementariamente, se dispone de una parcela escorrentía y sedimentos Gerlach (CC04) bajo condiciones de lluvia natural en la misma ladera de CCS, en la que durante el periodo de medida (13 años de duración) se ha registrado la dinámica de evolución de la respuesta que ha experimentado una aliaga muerta desde antes de su senectud hasta prácticamente su progresiva conversión a una zona de acumulación de hojarasca.

También se recurre a resultados derivados de la bibliografía disponible respecto al fenómeno de la hidrofobia y de la partición de la lluvia.

Para el análisis, las **propiedades superficiales** en las que se fija la atención para extrapolar la respuesta son comunes para cualquiera de las tres manifestaciones de materia seca considerada. Esencialmente hacen referencia a la morfología y al grado de hidrofobia de la superficie (Figura 3.3.7).

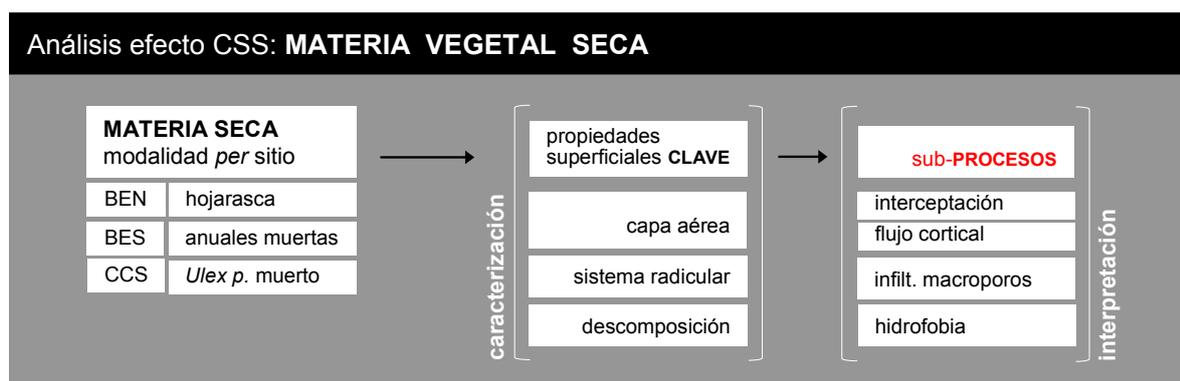


Figura 3.3.7 Estructura de análisis del efecto CSS para la categoría de materia vegetal seca.

El grado de desmantelamiento de la planta determina la interceptación, trascolación y flujo cortical. Son los **subprocesos** que consideramos relevantes en la definición de la respuesta y que estimamos a

partir de la **estructura** aérea concreta del resto vegetal al que nos refiramos. Destacar que con estructura nos referimos tanto a aspectos morfológicos como a la propia orientación del material respecto de la vertical. Además, incluimos el estado del **sistema radicular** como elemento importante en los mecanismos de infiltración de agua en el suelo.

Estas propiedades superficiales que se han considerado clave se asocian a una determinada dimensión de la respuesta, en cuanto a velocidad de inicio, estabilización y magnitud de la escorrentía que luego alimenten la fase de asignación en base a los tres parámetros de Horton, P_0 , α y F_c respectivamente.

(iii) Análisis de superficies VEGETADAS

En el área de Benidorm es donde se considera un mayor número de tipologías de vegetación en la cartografía (ver Tabla 5.1 en resultados), precisamente por el predominio del esparto, un caso particular en cuanto a la fisionomía de la planta que merece un tratamiento diferenciado con respecto a la clase genérica de herbáceas. Además en ambas laderas de Benidorm el *Brachypodium retusum* es la especie dominante de herbácea de porte bajo. Por este motivo se utilizan las parcelas de Benidorm como parte central del análisis de la respuesta de las superficies vegetadas, si bien se hace uso de simulaciones de las áreas auxiliares de CCN, FIS y AMN que sirven de apoyo.

Concretamente nos centramos en los resultados correspondientes a la ladera BEN, puesto que se dispone de un mayor número de parcelas vegetadas, eliminando el factor LOCAL y permitiéndonos así un nivel de análisis más exhaustivo de las variables relacionadas con la vegetación que afectan a la escorrentía (efecto CSS).

Las superficies vegetadas presentan por lo general un comportamiento bastante homogéneo frente a la escorrentía siendo prácticamente sumideros netos de agua con casi nulas tasas de escorrentía (valores mínimos de F_c en las simulaciones), aunque se presupone un determinado contraste en la respuesta en función del porte de la vegetación. Esto es por lo que el interés del análisis se dirige al intento de establecer diferentes tipologías genéricas de respuesta en función de determinadas propiedades clave de la vegetación que trascienda la caracterización de la respuesta por especie concreta (Figura 3.3.8).

En primer lugar se exploran los resultados de las simulaciones de lluvia buscando agrupaciones de parcelas por su analogía en la respuesta (Figura 3.3.8). Se registran pocas variaciones en los valores de F_c , por lo que se fija la atención en los dos restantes parámetros de Horton (Figura 3.3.8): (i) P_0 , umbral de precipitación a partir del cual se produce escorrentía en la curva, que nos informa sobre la relativa rapidez en la respuesta y (ii) α , parámetro que define el grado de curvatura de la línea, que muestra la progresión del incremento de escorrentía (brusco o suave) hasta alcanzar un nivel teórico estable.

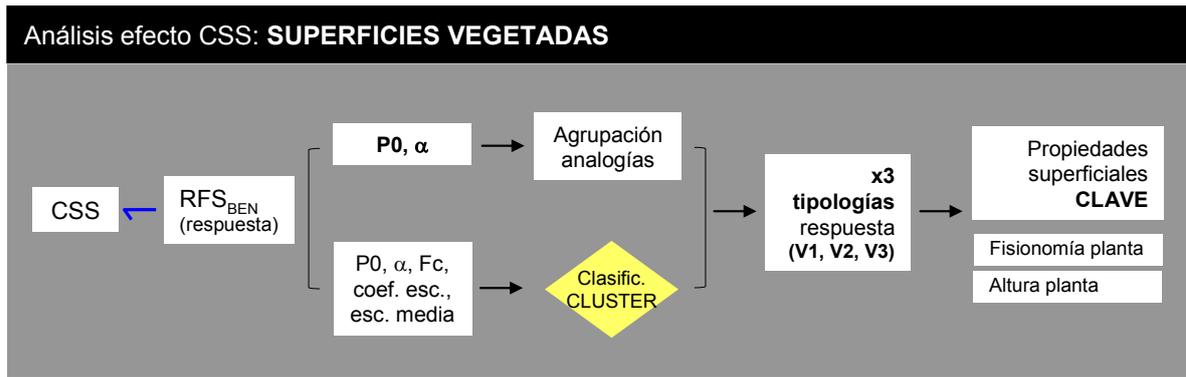


Figura 3.3.8 Estructura de análisis/Desglose metodológico del análisis del efecto CSS para la categoría de superficies vegetadas. Parámetros de Horton (P_0 ; α y F_c).

Posteriormente se acude a una clasificación mediante análisis cluster para corroborar las anteriores agrupaciones de parcelas y así establecer de una manera más robusta las tipologías de respuesta en base a determinadas propiedades superficiales clave que definen su respuesta (Figura 3.3.8). En el análisis cluster se añaden parcelas de vegetación de BES y CCS a modo de réplica, además de las parcelas de superficies no-vegetadas de BES y BEN para probar el valor de discriminación de respuestas del sistema de clasificación. Las variables que se introducen son los tres parámetros de Horton (P_0 , α y F_c), coeficiente de escorrentía y tasa de de escorrentía media de la simulación.

3.3.2. Sistema de Asignación de curvas de escorrentía

Basado en la clasificación realizada y explicada en el punto anterior se procedió a asignar a cada tipo de CSS lo que denominamos el *hidrograma tipo* o *característico* en las áreas de estudio.

Esto permitió caracterizar la dinámica hidrológica con información temporal y de magnitud de la escorrentía. Todo esto teniendo en cuenta que las condiciones de esa *curva tipo* son representativas de condiciones de humedad antecedente de suelo seco debido a que los experimentos de simulación de lluvia se realizaron en esas condiciones.

La asignación consistió en establecer los valores de los tres parámetros de Horton (P_0 , α y F_c) con una lógica apropiada en la que se represente adecuadamente los efectos CSS y LOCAL simultáneamente. En términos generales se ha observado como las superficies no-vegetadas precisan de la consideración LOCAL en la definición de la respuesta, a excepción de la ROCA, a la que se da un carácter *universal* (Figura 3.3.9). También ocurre para la modalidad de materia seca de hojarasca (HOJAR) por considerarse un caso particular de superficie no-vegetada, que precisa de un ajuste LOCAL. Sin embargo, los componentes superficiales relacionados con la vegetación, entre las que se incluyen las modalidades de materia seca de plantas muertas (PLMTA), presentan un comportamiento *general/universal* en el sentido que se asume una respuesta constante independientemente de las características del sitio (Figura 3.3.9). Esto sucede porque el efecto modulador del CSS domina la respuesta imponiéndose sobre la influencia de los factores locales del sitio.

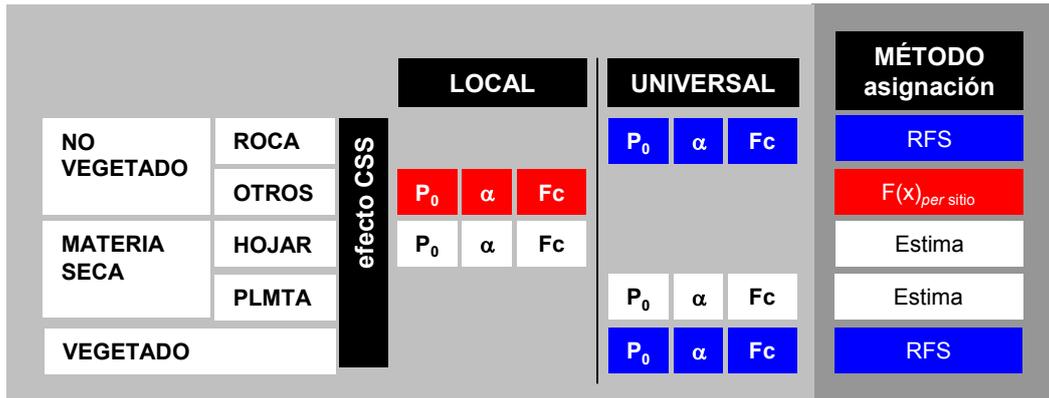


Figura 3.3.9 Criterios de asignación respecto de (i) la consideración LOCAL (asignación *per sitio*) o *universal* (genérica para todas las áreas) y (ii) resumen del método de asignación utilizado (RFS: simulaciones de lluvia; F(x): función de ajuste para la interpolación).

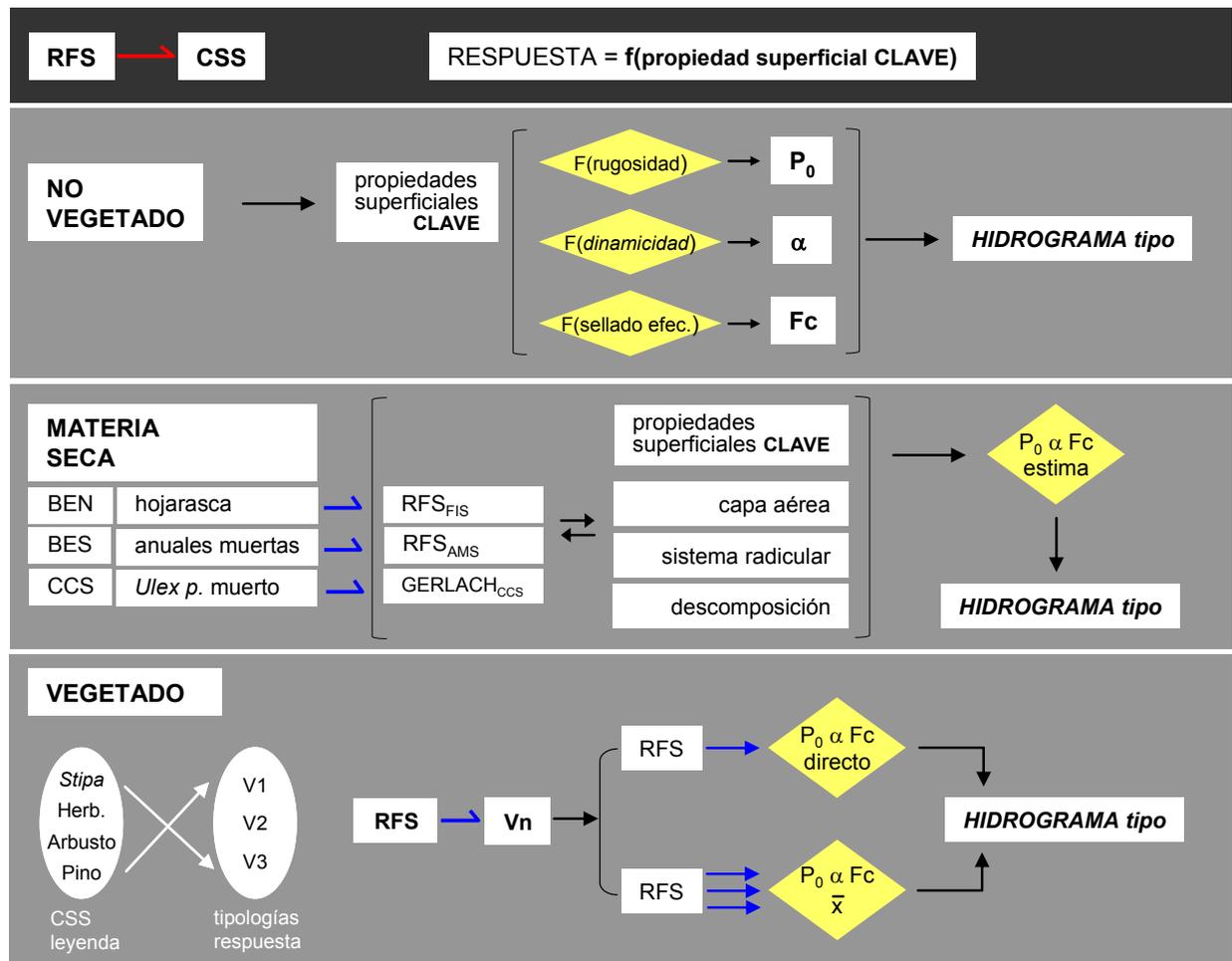


Figura 3.3.10 Metodología asignación de curvas a cada componente superficial del suelo.

Para la subcategoría de materia seca, cuya modalidad es diferente en cada área de estudio y de las que no se dispone de simulaciones *ad hoc*, se realiza la asignación de los valores de los parámetros de Horton (Figura 3.3.10).

El método particular de asignación ha sido diferente según los casos (Figura 3.3.9), dependiendo de los resultados obtenidos en la fase de análisis y de la propia disponibilidad de simulaciones de lluvia (RFS), metodología que se especifica con mayor detalle en la Figura 3.3.10. El denominador común para todas las tipologías de CSS es establecer el protocolo de asignación en función de las propiedades superficiales que se han considerado clave en la respuesta (Figura 3.3.10). Respecto de la subcategoría de superficies no vegetadas, teniendo en cuenta el grado de cobertura y la posición de RF se construyó una función de ajuste ($F(x)$) en la Figura 3.3.10 en base a las simulaciones disponibles que consideramos como *modelo de asignación* para el cálculo de los tres parámetros de Horton, adaptado éste a cada área de estudio.

Finalmente, para la subcategoría de superficies vegetadas el procedimiento consiste en primer lugar en asignar cada clase de vegetación a una de las tres tipologías genéricas de respuesta obtenidas en la fase de análisis. La respuesta de cada tipología se define según la disponibilidad de parcelas de simulación, bien en asignación directa o bien promediando los valores de cada parámetro según el número de parcelas de simulación de lluvia disponibles para cada tipo (Figura 3.3.10).

3.4. MODELO DE SIMULACIÓN DE LA RESPUESTA HIDROLÓGICA A ESCALA DE LADERA

La escala de ladera es el resultado de la integración espacial de todas las respuestas *in situ* (*patch scale*) con una dinámica de fuente-sumidero (*stand scale*) que caracteriza al medio semiárido propiciado por un marcado contraste de respuesta entre tipos de superficies (vegetado vs. desnudo). Este contraste viene reforzado por el hecho de que las áreas vegetadas suelen tener un mayor espesor edáfico como resultado de procesos de retroalimentación (Figura 3.4.1). La conectividad hidrológica y de sedimentos a escala de ladera y con los cauces marca la transferencia a un nivel superior, la cuenca.

La escorrentía a escala de ladera se aborda comúnmente desde una aproximación binaria de mosaico de suelo vegetado vs. desnudo, entendida como los *caminos del agua* y su conectividad espacial. Aquí ampliamos el rango de heterogeneidad descendiendo al nivel de CSS como unidad mínima de respuesta, especialmente los referidos a las tipologías de suelo desnudo. Desagregación necesaria a esta escala puesto que la diferenciación de la respuesta se considera tiene un importante efecto en los mecanismos de funcionamiento hidrológico general de la ladera, considerando el modelo binario insuficiente y más propio de la escala superior de cuenca.

Con el objetivo específico de establecer umbrales de conectividad, se analizan: (i) por un lado el comportamiento interno de la escorrentía y la infiltración según el modelo de partición de la escorrentía adoptado, y (ii) por otro la salida final de la ladera, como resultante de la composición interna.

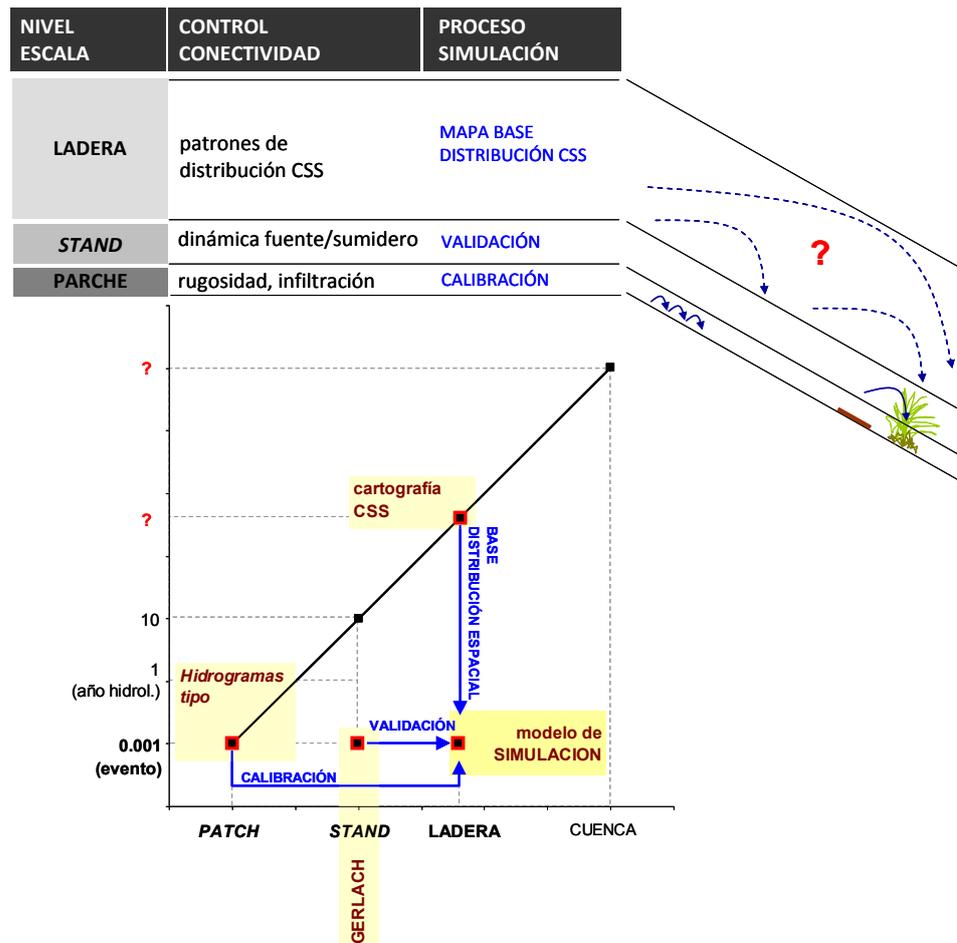


Figura 3.4.1 Metodología general de simulación de escorrentía a escala de ladera.

3.4.1. Modelo de simulación de escorrentía

Se intentó integrar de manera muy simplificada los patrones de distribución de CSS con la respuesta hidrológica a escala de ladera mediante una rutina de simulación que es un **modelo espacialmente distribuido de base empírica** utilizando el ajuste a la ecuación de escorrentía de Horton para cada CSS, correspondientes a las unidades mínimas de respuesta. Se implementó mediante programación en Visual Excel, en formato de herramienta Macro.

Respecto a la estructura general, son tres categorías de criterios las que definieron el escenario concreto de simulación (Figura 3.4.2), por un lado (i) aquellos relacionados con la **rutina de distribución** o manera en que el flujo se distribuye, que posee una parte fija de funcionamiento del modelo, y otra parte variable que son los parámetros que hay que especificar. Por otra parte (ii) están los referidos a las **condiciones específicas del evento de precipitación** bajo el que se simula, que vienen determinados por las características del experimento de simulación de lluvia (RFS) del que proceden los datos de calibración. El tercer criterio transversal al resto (iii) es el que atiende a **las especificaciones del sitio** (efecto LOCAL) y de los diferentes **CSS** (efecto CSS).

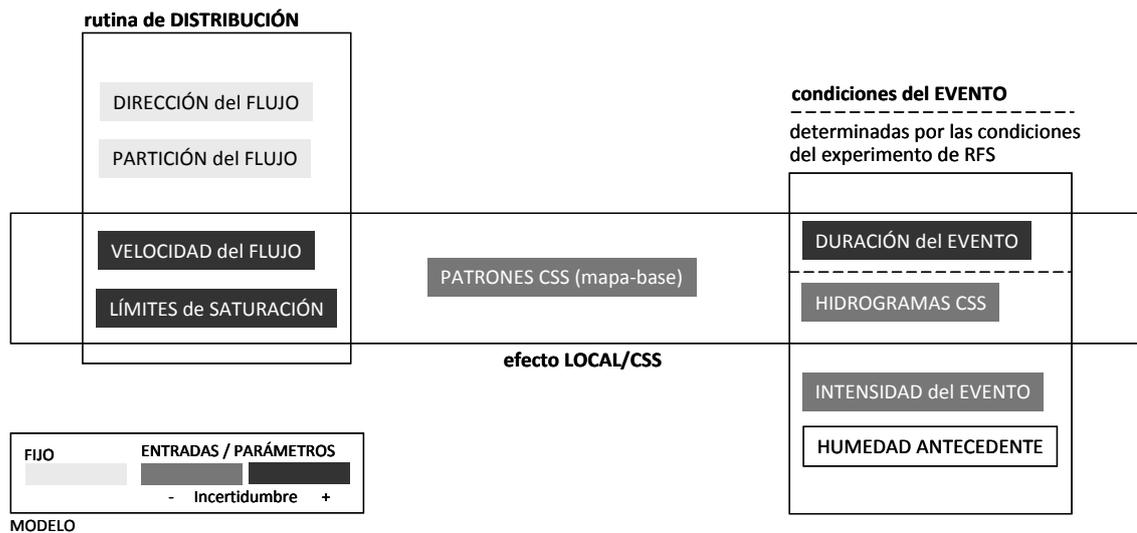


Figura 3.4.2 Croquis sintético de la modelización de la escorrentía a escala de ladera.

Si bien las entradas del modelo referidas a los patrones de distribución (mapa base) y a la respuesta (hidrogramas) de CSS (Figura3.4.2) parten de unas evidencias empíricas directas, los parámetros referidos a las especificaciones de sitio, como son la **velocidad media del flujo** y los **límites de saturación** (Figura3.4.2), son aspectos de mayor incertidumbre debido a la gran heterogeneidad en su distribución y la imposibilidad material de su registro pormenorizado. A pesar de ello se estima oportuno un ejercicio de simplificación en su estimación que permita introducirlos como variables del modelo.

Con respecto a las **características del evento de precipitación simulado**, se deben reproducir las mismas condiciones de los experimentos de simulación de lluvia (RFS) de donde provienen los hidrogramas introducidos, referidas a la **intensidad de precipitación** y las condiciones de humedad del suelo (Figura3.4.2). Sin embargo, la **duración del evento** se alargó en la simulación hasta que alcanzó una tasa de infiltración final estable (F_c). La **humedad antecedente** no es un parámetro que se defina directamente en el modelo, si bien la rutina de distribución reproduce unas condiciones iniciales de suelo seco al partir de unos valores de infiltración (llenado del suelo) igual a cero. Sin embargo, la **duración del evento** puede alargarse respecto del experimento siempre que en la curva empírica se haya alcanzado la tasa de infiltración final estable (F_c), que es nuestro caso.

En general, la lógica de la **rutina de distribución del flujo**, con los diferentes aspectos que la integran (Figura3.4.2), representa en última instancia el modelo conceptual del proceso de generación de escorrentía que se propone, o dicho de otra forma, la propuesta de simplificación del fenómeno real.

Respecto a la **dirección del flujo** sólo se considera la componente dominante ladera abajo descartando los flujos transversales por efecto de la microtopografía (Figura 3.4.3a), justificado por las limitaciones de simular en una estrecha franja, en contraposición al *continuum* natural de las laderas en toda su extensión. De este modo se evita las pérdidas de agua en los límites laterales que no pueden ser compensadas por las posibles entradas de flujo de las áreas adyacentes.

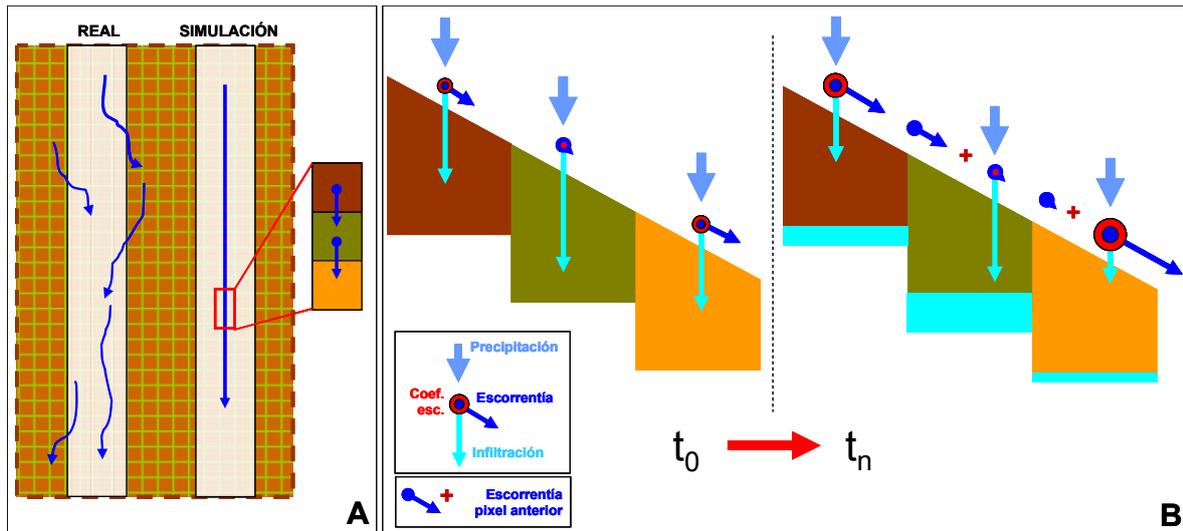


Figura 3.4.3 Esquema del núcleo fijo de la rutina de distribución inter-píxel del modelo de escorrentía. (A) Dirección del flujo; (B) Regla de partición del flujo basado en el coeficiente de escorrentía.

El núcleo del modelo se encuentra en la **regla de partición del flujo** (Figura 3.4.3b) donde se reproduce el proceso precipitación-infiltración-escorrentía. Así, el *input* de agua correspondiente en cada tiempo y para cada píxel es dividido en dos en función del coeficiente de escorrentía obtenido a partir del hidrograma. Una parte se almacena en forma de infiltración y otra se convierte en flujo de escorrentía que se transmite al píxel contiguo aguas abajo en el siguiente tiempo (*runon*). El *input* de agua es la suma de la precipitación correspondiente a la fracción de tiempo, más la escorrentía que le llega del píxel anterior, en el caso de que la hubiese. Y así sucesivamente, hasta que el agua infiltrada alcanza el límite de saturación establecido, momento en el que la infiltración es igual a cero y todo el *input* de agua de ese píxel se convierte en escorrentía que pasa íntegramente al píxel de abajo.

OPCIONES para la RUTINA de SIMULACIÓN

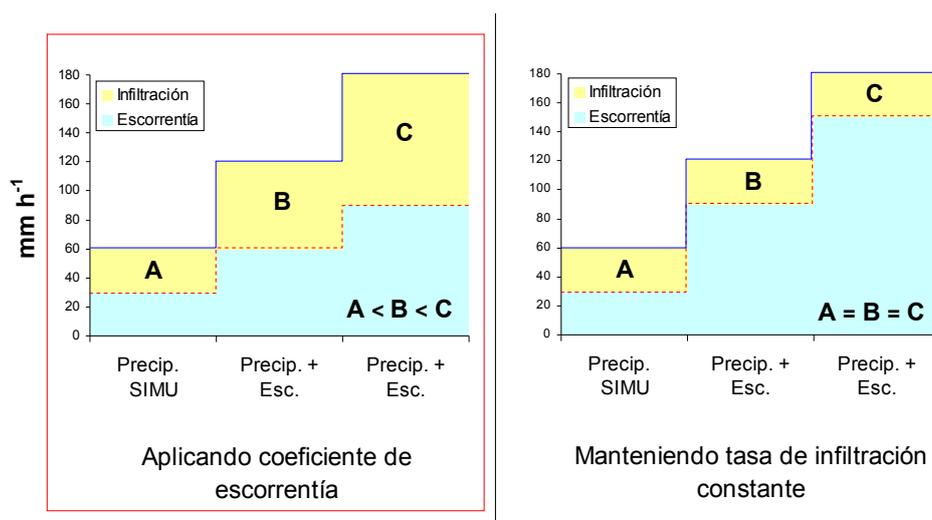


Figura 3.4.4 Opciones conceptuales de partición del flujo superficial a medida que incrementa el input de agua por precipitación y escorrentía.

La cuestión de fondo es la elección del **coeficiente de escorrentía** en lugar de aplicar la tasa de infiltración resultante del hidrograma, consiguiendo así el incremento de la infiltración correspondiente a medida que la escorrentía del píxel de arriba también aumenta (Figura 3.4.4), coherente con el incremento de la altura de la lámina de agua que provoca un aumento en la infiltración.

La **saturación del perfil del suelo** es una componente controvertida que engloba aspectos complejos referidos tanto a los propios mecanismos de infiltración y movimiento de agua en el suelo como a las características edáficas de retención/almacenamiento de agua y de la propia profundidad del suelo. Sin embargo sí existen evidencias en condiciones de lluvia natural de que superado cierto umbral en la magnitud de la precipitación se alcanza la saturación de ciertas áreas de la ladera (Calvo-Cases *et al.*, 2003). El modelo permite la definición de límites al almacenamiento de agua para cada CSS, que determina un umbral de *llenado* del suelo a partir del cual se anula la infiltración en ese píxel (Figura 3.4.5), y que llegado a este punto en la simulación, la respuesta en los píxels afectados **se asimila al mecanismo de generación de escorrentía por exceso de saturación**, sin que se presuponga por ello una completa saturación del perfil de suelo en la realidad. Se asume por tanto que alcanzado determinado umbral de llenado de suelo, se rebasa lo que aquí denominaremos la **capacidad de almacenamiento efectiva del suelo**. Concepto que desarrollamos para recoger una tendencia general de comportamiento observado en los resultados obtenidos de las parcelas Gerlach en cada ladera de estudio, y que evidencia un disparo en la escorrentía a partir de un determinado umbral de magnitud de precipitación, pero sin la posibilidad real de haber saturado por completo el perfil de suelo.

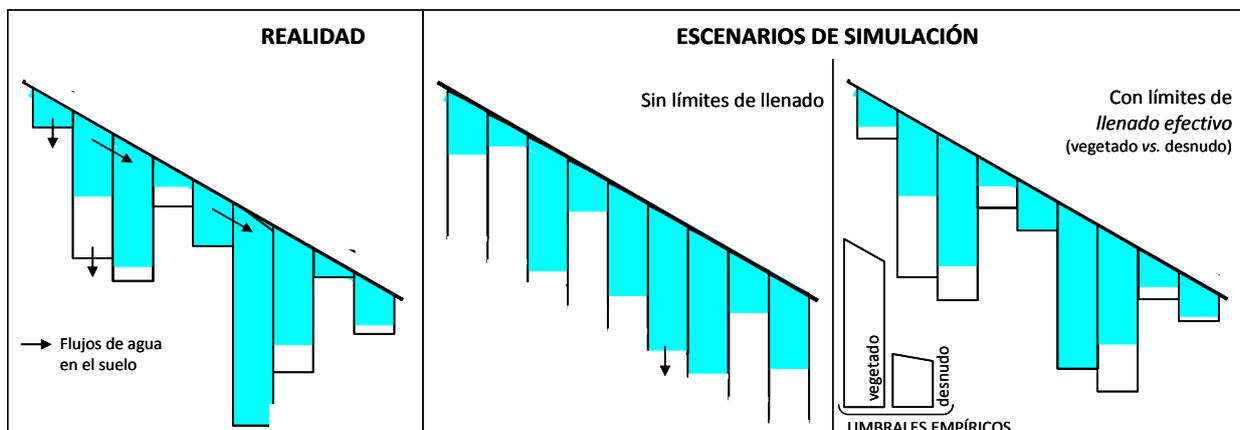


Figura 3.4.5 Conceptualización de los límites de saturación, realidad vs. simplificación en los escenarios de simulación propuestos. Los flujos de agua representan el flujo lateral sub-superficial y la percolación a capas profundas.

La **velocidad** del flujo superficial es variable a escala centimétrica en función tanto de la magnitud y altura de la escorrentía, como de la rugosidad superficial y la pendiente, diferencias no recogidas directamente en el modelo, pero indirectamente al estar integradas en la respuesta del hidrograma tipo basado en los resultados de las simulaciones de lluvia. Se definió una **velocidad media** del flujo, ajustada al orden de magnitud de la pendiente media de la ladera basada en resultados empíricos de la bibliografía que definen la relación entre estas dos variables (pendiente vs. velocidad de flujo), que

si bien son escasas y no representan las mismas condiciones, sí aportan un rango probable de respuesta.

Pese a que el fenómeno de la escorrentía es un proceso continuo, la distribución del flujo requiere la discretización del proceso en intervalos de tiempo, que en nuestro caso se opera en fracciones de minuto (1/36), dependiendo de la velocidad establecida y del tamaño de píxel. Esto desde el punto de vista del cómputo interno de distribución de la escorrentía y acumulación de la infiltración. En la salida gráfica en forma de mapas para el análisis de la variación de los patrones espaciales de escorrentía a lo largo del evento requirió la selección de tiempos representativos. El criterio de selección de estos tiempos para la salida cartográfica corresponde a una optimización en términos de representatividad de la dinámica de la respuesta, y por tanto dirigidos a la detección de umbrales de cambio en cada caso. También del modelo se obtiene la magnitud de salida de escorrentía al pie de la ladera, que en este caso se utiliza todo el rango de tiempos para mostrar los hidrogramas de respuesta.

3.4.2. Escenarios de simulación

Los escenarios de simulación se definen por el conjunto de parámetros que se especifican en el modelo como una propuesta de simplificación de la realidad, si bien para el análisis comparativo entre sitios se mantuvieron constantes las condiciones del evento de precipitación y la velocidad de distribución del flujo. El resto de entradas del modelo reprodujeron las condiciones que caracterizan a cada uno de los casos de estudio.

Los escenarios considerados son el cruce de dos factores, (i) el climático representado por las tres áreas de estudio con sus respectivos patrones de distribución de CSS e *hidrogramas tipo* y (ii) los *límites de llenado o almacenamiento efectivo*.

Respecto a los ***límites de almacenamiento efectivo*** se contemplaron dos escenarios (Figura 3.4.5): (i) escenario control sin límites a la infiltración que no contempla la condición de llenado de agua del suelo, y por tanto con un *mecanismo Hortoniano puro* durante todo el evento. Y (ii) escenario simplificado donde la respuesta al *llenado efectivo* se contrasta entre áreas vegetadas y no-vegetadas, en este caso asumiendo se alcanza un *modelo mixto de escorrentía* a escala de ladera, reproduciéndose ambos mecanismos básicos, *Hortoniano* y *por exceso de saturación* alcanzados determinados umbrales (Calvo-Cases *et al.*, 2003). A pesar de que el modelo simule a efectos prácticos el mecanismo *por exceso de saturación*, no se está asumiendo por ello que el perfil de suelo necesite estar saturado en su totalidad.

Para definir estos límites de *llenado efectivo* en áreas vegetadas y desnudas del segundo escenario se buscaron los respectivos umbrales de respuesta en las parcelas Gerlach a modo de calibración. Para ello se seleccionaron las lluvias registradas en condiciones de suelo seco después de un período largo sin precipitación y que en su mayoría coinciden con el final del verano. Las parcelas se clasificaron en vegetadas o no-vegetadas según su dominancia de cobertura en la parte más próxima al colector y se analiza su respuesta en función de la magnitud de precipitación buscando un umbral en el que la

escorrentía se dispare asumiendo entonces unas condiciones de superación de la *capacidad de almacenamiento efectiva* del suelo.

Ambos escenarios sólo se aplican a la simulación sobre el área de las parcelas Gerlach con el propósito de contrastar estas dos hipótesis de funcionamiento. El modelo validado será el que finalmente se aplique a escala de la ladera completa.

Respecto a los términos fijos de la rutina (Figura 3.4.2), la simulación corresponde con un evento que reproduce las condiciones de los experimentos de lluvia en campo, en situación de suelo seco y con una precipitación de intensidad constante de 55 mm h^{-1} y de 60 min de duración, suficiente en todos los casos para alcanzar una tasa de escorrentía estable a escala de parche (*patch scale*). Éstas son unas características de precipitación que no corresponden con ningún evento en condiciones de lluvia natural, pero pretendemos que la simplificación de los parámetros que definen el evento simulado faciliten la interpretación de diferencias fundamentales en el comportamiento de la respuesta frente a la escorrentía en estos tres diferentes ambientes.

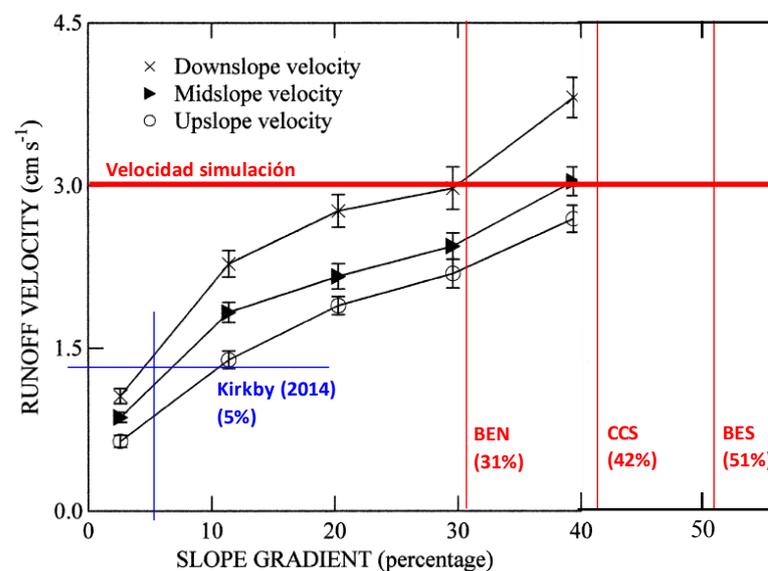


Figura 3.4.6 Decisión en la selección de la velocidad media de simulación para todas las laderas basado en los datos empíricos de que relacionan la pendiente con la velocidad de la escorrentía en parcelas en laboratorio según Fox y Bryan (1999).

La velocidad media de distribución de la escorrentía se decide según los datos empíricos obtenidos en Fox y Bryan (1999) en función del gradiente de pendiente aunque en condiciones de laboratorio (intensidad media de la simulaciones de 49.1 mm h^{-1} en parcelas de $100 \times 40 \times 10 \text{ cm}^3$) y mostrados en la Figura 3.4.6. Además se compara con la velocidad utilizada en otra simulación por Kirkby (2014) quien se basa en datos de la bibliografía (en su caso según Holden *et al.*, 2008 y Emmett, 1970) resultando ser congruentes con los datos presentados (Figura 3.4.6). Los autores atribuyen el repunte de la velocidad en la pendiente del 40% (Figura 3.4.6) a una menor resistencia del flujo por la formación de micro-canales en los suelos preparados para los experimentos, por lo que en

condiciones naturales donde este proceso no ocurre la trayectoria de la relación tiende a estabilizarse a partir de la pendiente del 30%. Puesto que todas las laderas están en un rango superior al 30%, se toma una velocidad media para todas las laderas de 3 cm s^{-1} . Se prefiere además un valor constante para todas las laderas para no introducir otro factor de variabilidad en la interpretación de los resultados de la simulación.

3.4.3. Confirmación del procedimiento de simulación a nivel de proceso mediante parcelas de medida en condiciones de lluvia natural

El ejercicio de simulación de la escorrentía aquí propuesto no trata de reproducir unas condiciones reales de evento de precipitación, sino de explorar el comportamiento del sistema en base a unas hipótesis de estado dentro de unos límites probables y desde una perspectiva de máxima simplificación. Sin embargo los datos para la validación provienen de condiciones reales de lluvia natural (parcelas abiertas tipo GERLACH) con toda la complejidad asociada, relacionada tanto con la variabilidad de los eventos de precipitación como de la propia heterogeneidad del suelo.

Es por ello que la comprobación se basa en primer lugar en la identificación de ciertos patrones relevantes en la respuesta y comprobar posteriormente que son reconocibles en ambas situaciones. Tiene especial interés la comparación de la respuesta entre diferentes parcelas, concretamente aquellas más diferentes en cuanto a CSS.

Los datos de la simulación se presentan en su dato de salida de escorrentía en forma de hidrograma (l m^{-1}) en los respectivos segmentos que corresponden a la localización de las parcelas en la cartografía de CSS, extendiendo el área de simulación de cada parcela desde el colector hasta la divisoria. En el caso de los datos de las parcelas, se establecen rangos de eventos de precipitación atendiendo a su magnitud y en base a la identificación de umbrales de respuesta general de las parcelas y a la disponibilidad de eventos en cada área. Para cada parcela se calcula su respuesta promedio (l m^{-1}) en los diferentes rangos de precipitación registrados. La comparación se realiza observando las trayectorias relativas de las parcelas, estableciendo el símil entre el avance de la precipitación del evento de simulación con el incremento en los rangos de precipitación natural.

La intensidad de la precipitación es un factor que aquí se obvia en la clasificación de rangos de eventos, a pesar de su reconocida influencia en la respuesta, puesto que interesa principalmente la cantidad de agua total introducida en el sistema y potencialmente almacenada en el suelo, para poder identificar umbrales de *llenado efectivo* del suelo y su respectivo efecto en la escorrentía. Se justifica en que bajo condiciones de escorrentía hortoniana (a partir de cierto umbral de intensidad), la redistribución del flujo superficial se considera que es gobernada por los CSS, y por tanto en algún grado proporcional con el cambio de intensidad, no afectando por tanto de forma significativa a los patrones de distribución de la escorrentía.

En los casos de las parcelas en las que se ha identificado un cambio en los CSS en las proximidades del colector a lo largo del periodo de medida se ha reproducido la condición de cobertura similar a la inicial para poder simular la respuesta de la parcela bajo ambos escenarios. En estos casos la serie de

datos de eventos escorrentía se divide aproximadamente hacia la mitad del periodo para así contrastar la evolución de su respuesta.

CAPÍTULO 4

PATRONES DE DISTRIBUCIÓN DE COMPONENTES SUPERFICIALES DEL SUELO (CSS) A ESCALA DE LADERA

En este capítulo se aborda el estudio de las propiedades de *forma* de las laderas que más interdependientes son con los procesos en escalas temporales relativamente breves. Así se analizan los patrones espaciales de CSS según lo expuesto en la figura 3.1.8 (apartado 3.1.3 de metodología), en un flujo de trabajo que se basa en la comprobación de existencia de heterogeneidad en la composición entre sitios y laderas de estudio, y en la posterior constatación de la existencia de patrones espaciales (no-aleatoriedad en la distribución). Para finalmente interpretar esos resultados desde la perspectiva de proceso-patrón.

Para completar el análisis y la interpretación de los patrones obtenidos en clave de procesos, destacar que además se añade la dimensión funcional o de respuesta de los diferentes CSS. Esto es, la traducción de los CSS en términos de procesos, que en este caso se realiza en el marco de los ciclos de retroalimentación involucrados en la degradación y erosión del suelo propuesto por Kirkby (1996) (ver Figura 3.1.11), donde el bucle de blindaje superficial es el elemento clave que controla el resto de subprocesos con un comportamiento umbral en función del grado de cobertura de FR de la fracción abiótica del suelo. En este sentido, en primer lugar (i) se hace la valoración global de cada ladera en términos de blindaje superficial que corresponde con la escala de sitio, para posteriormente (ii) ya a escala de ladera presentar el análisis pormenorizado de la casuística particular de cada transecto de ladera en términos de patrones de distribución y su interpretación en clave de procesos.

Los **foto-mosaicos** correspondientes a cada área de estudio se muestran en la Figura 4.1; el solape entre fotogramas se ha optimizado al máximo y minimizado la distorsión para el conjunto de la ladera, por lo que reproduce con una elevada fidelidad la geometría del patrón de distribución de CSS. Esta cuestión resulta fundamental en el marco de los objetivos generales de la presente tesis, para el análisis detallado de los patrones espaciales de distribución y conectividad de la escorrentía.

Puesto que las laderas estudiadas difieren en su génesis y condiciones ambientales actuales y pasadas, el resultado de la cartografía de los tres transectos (Figura 4.2) nos muestra ciertas diferencias en sus respectivas **leyendas** según la composición de CSS. Esta viene determinada por los elementos presentes en cada subambiente, así su relativa abundancia y representatividad que determinan si merecen ser incluidos en una clase. Fundamentalmente los subambientes difieren en

relación con la vegetación y con la ausencia significativa de FR en posición embebida en algunos casos, si bien el mayor contraste se encuentra entre las dos áreas en su conjunto, BE y CC.

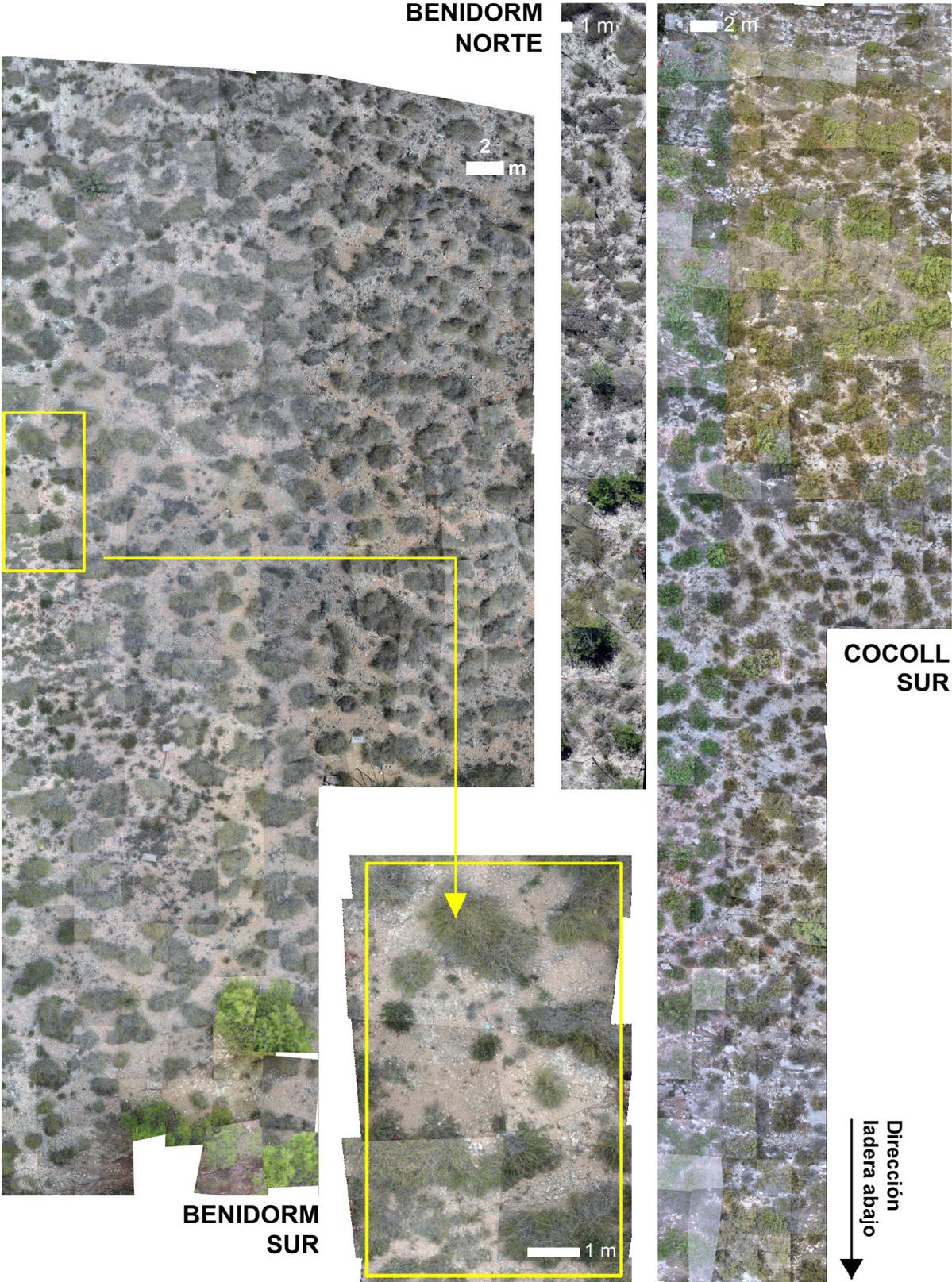


Figura 4.1 Foto-mosaicos de los transectos de ladera.
112

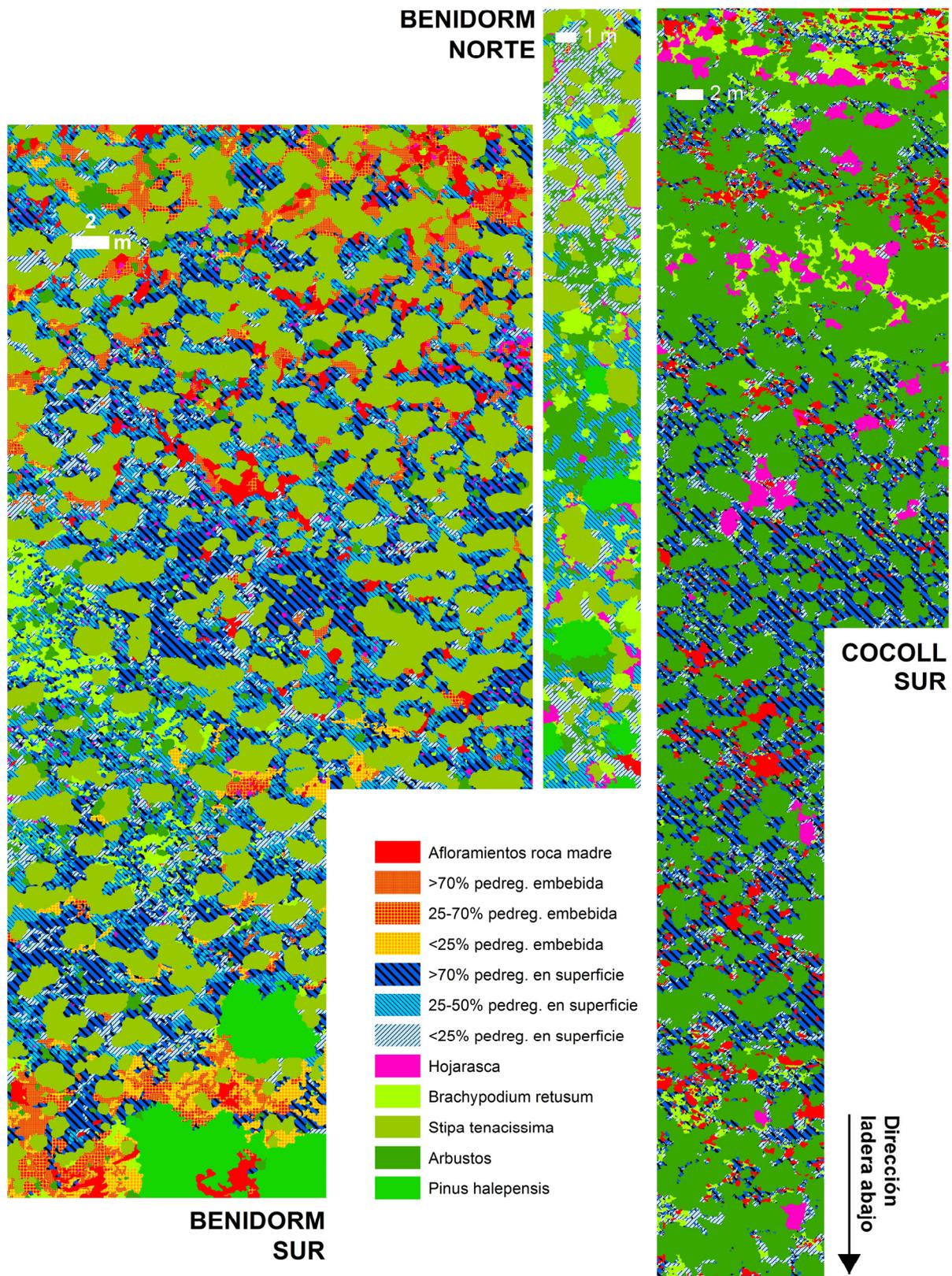


Figura 4.2 Cartografía de componentes superficiales del suelo (CSS). A: área de Benidorm; B: área de Cocoll.

Respecto a las clases de vegetación, el criterio directo de incorporación a la leyenda de la cartografía ha sido la diferenciación entre herbáceas, arbustos y estrato arbóreo por su marcado **contraste fisionómico** y de respuesta hidrológica (intercepción y transmisión principalmente). Aunque también se han incorporado subcategorías atendiendo a un criterio de **abundancia** y por tanto de relevancia. Este es el caso de las herbáceas en **Benidorm**, donde se diferencian dos especies dominantes, *Stipa tenacissima* y *Brachypodium retusum*. En el caso del estrato arbóreo, la única especie presente es *Pinus halepensis*, mientras que para los arbustos se consideran una clase genérica. En **Cocoll**, con una situación de mayor diversidad de especies y con una disposición más intrincada, no se ha considerado oportuno la individualización de especies como categoría de leyenda y se ha optado por la cartografía de las dos fisionomías presentes en el transecto de ladera, la arbustiva y la herbácea.

En estrecha relación con la vegetación, está la categoría genérica de **materia seca**, referida a restos vegetales secos en cualquiera de sus manifestaciones (hojarasca o plantas muertas). Si bien, se detecta un cierto predominio de una u otra modalidad dependiendo del subambiente o ladera en que nos encontramos. En BEN la acumulación de hojarasca es la subcategoría predominante, mientras que en BES es prácticamente inexistente, observándose una mayor presencia de plantas anuales secas o agostadas. En CCS, pese a existir una notable presencia de hojarasca, su distribución muestra un patrón peculiar, bien concentrada bajo planta (a la sombra de la cartografía) o bien muy dispersa espacialmente, sin la relevancia suficiente para ser incorporada como clase en la leyenda. Sin embargo, es característico de esta ladera la presencia de individuos de Aliaga (*Ulex parviflorus*) ya secos y que ocupan una importante superficie, si bien se observan diferentes grados de descomposición, desde la planta muerta pero con su arquitectura aérea todavía intacta, hasta amplios espacios con intensa acumulación de residuo seco sobre el suelo donde ya sólo queda el vestigio de la planta; en ambos casos se han cartografiado como tales.

Respecto a las diferencias observadas en las leyendas dentro del dominio **abiótico**, lo más destacable es el mayor número de subcategorías en las **superficies de fragmentos rocosos** (FR) en BE, donde se incluyen los tres **intervalos de cobertura** (<25%; 25-70%; >70%) en las dos posibles **posiciones**, tanto de pedregosidad *parcialmente embebida* como *en superficie*, mientras que en CC tan sólo aparecen *en superficie* en los dos intervalos de cobertura extremos (<25% y >70%). Esto se debe a que CC presenta una distribución de FR más contrastada, sin superficies de cobertura intermedia, además de una posición de los clastos indiferenciada a lo largo de la ladera, siempre en una posición predominante *sobre la superficie* del suelo. El intervalo de menor cobertura de FR (FR25su) se distribuye de una manera muy intrincada entre la extensión generalizada de FR70su y en el contorno/perímetro de la vegetación, sin configurar en sí mismo grandes manchas de cobertura. Además en BE, a diferencia de CC, el suelo desnudo presenta en general desarrollo de **costra superficial**.

4.1. CARACTERIZACIÓN DE LA HETEROGENEIDAD Y PATRONES A ESCALA DE SITIO: DIVERSIDAD DE CCS Y GRADIENTES DE DISTRIBUCIÓN

En **términos generales** los porcentajes de cobertura totales (Figura 4.3) ofrecen una aproximación a la relativa **dominancia o equidad** en la distribución de tipologías de componentes superficiales (CSS),

así como el **grado de diversidad** de éstos. En este sentido BEN y CCS presentan una **dominancia** coincidente de las superficies vegetadas con respecto a las no-vegetadas (en torno al 62% y 38% respectivamente), con una ratio de componentes biótico vs. abiótico de 1.6, en una situación de evidente **control de la componente biótica en los procesos**. En el caso de BES la situación se invierte con una mayor dominancia de las superficies no-vegetadas con respecto a las vegetadas (en torno al 55% y 45% respectivamente), aunque su ratio biótico/abiótico (0.8) muestra mayor control abiótico sobre los procesos.

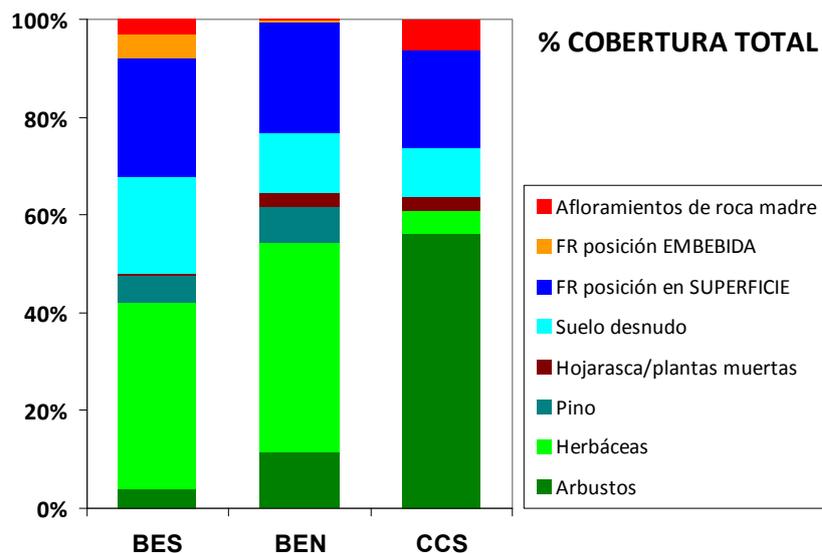


Figura 4.3 Cobertura superficial total (%) por transecto de las categorías generales de los componentes superficiales del suelo (CSS). Se presenta las superficies pedregosas descompuestas en sus fracciones correspondientes de fragmentos rocosos (FR) y suelo desnudo.

Con respecto a la **diversidad de subambientes** se observan diferencias significativas entre las tres áreas de estudio (Figura 4.3 y Tabla 4.1). Ambas laderas de BE presentan un claro dominio de las herbáceas (en torno al 40%, de *Stipa tenacissima* y *Brachypodium retusum*) en relación al estrato arbustivo en la vegetación (3.8% para BES y 11.5 en BEN), siendo el caso contrario en CC, con claro predominio de arbustos en su composición, con 56.1% (*Ulex parviflorus* y *Rosmarinus officianalis*) frente a los 4.6% de herbáceas. BE además diversifica el rango de tipos fisiológicos de vegetación presentando una sensible cobertura de vegetación arbórea (hasta el 7%, *Pinus halepensis*). En cuanto a la porción de cobertura no-vegetada, si bien todos los ambientes presentan una elevada pedregosidad superficial, dominada en todos los casos de la tipología de FR *en superficie* (llama la atención que en todos los casos en torno al 30% de cobertura), BES muestra una mayor diversificación de subambientes, al incorporar de manera significativa las superficies con pedregosidad en posición *de embebido parcial*, con una contribución del 9.2%. BEN, sin embargo, aunque presenta las mismas tipologías, muestra una mayor pobreza de subambientes no-vegetados, aparecen anecdóticamente la roca madre (0.4%) y los FR embebidos (0.9%). CCS incrementa de manera sustancial la superficie de afloramientos de roca madre con respecto al resto (6.2%), si bien no presenta pedregosidad embebida.

Subyacente a este contraste en la composición entre las diferentes laderas se identifican determinados gradientes de cobertura coherentes con el gradiente climático propuesto (BES-BEN-CCS).

Tabla 4.1 Porcentajes de cobertura según las clases directas de la cartografía y descomposición de las clases de pedregosidad (*) en sus respectivas fracciones puras de cobertura de fragmentos rocosos (FR*) vs. suelo desnudo (Desn.*) en base a los diferentes intervalos de FR.

		BES		BEN		CCS	
NO-VEGETADO (ciclo ABIÓTICO)		52.5		38.3		39.3	
	Afloramientos rocosos	3.0		0.4		6.2	
	Presencia FR (general):	48.9		35.2		30.2	
		Desn.*	FR*	Desn.*	FR*	Desn.*	FR*
		19.9	29.0	12.3	22.9	9.9	20.2
	en SUPERFICIE:	39.7		34.3		30.2	
		15.6	24.1	11.5	22.8	9.9	20.2
	FR <25%	6.4		0.5		7.4	
		0.8	5.6	0.1	0.4	0.9	6.5
	FR 25-70%	13.2		16.0		-	
		6.3	7.0	7.6	8.4	-	-
	FR >70%	20.0		17.8		22.7	
		3.0	17.0	2.7	15.2	3.4	19.3
	EMBEBIDOS:	9.2		0.9		-	
		4.3	4.9	0.8	0.1	-	-
	FR <25%	3.0		0.9		-	
0.4		2.7	0.1	0.8	-	-	
FR 25-70%	2.0		-		-		
	0.9	1.0	-	-	-	-	
FR >70%	4.2		-		-		
	0.6	3.5	-	-	-	-	
VEGETADO (ciclo BIÓTICO)		47.5		61.7		60.7	
	Arbóreo	5.3		7.5		-	
	Arbustivas	3.8		11.5		56.1	
	Herbáceas:	38.4		42.7		4.6	
	<i>Stipa t.</i>	34.7		25.0		-	
	<i>Brachypodium r.</i>	3.6		17.8		-	
	Materia seca	0.6		2.7		3.0	

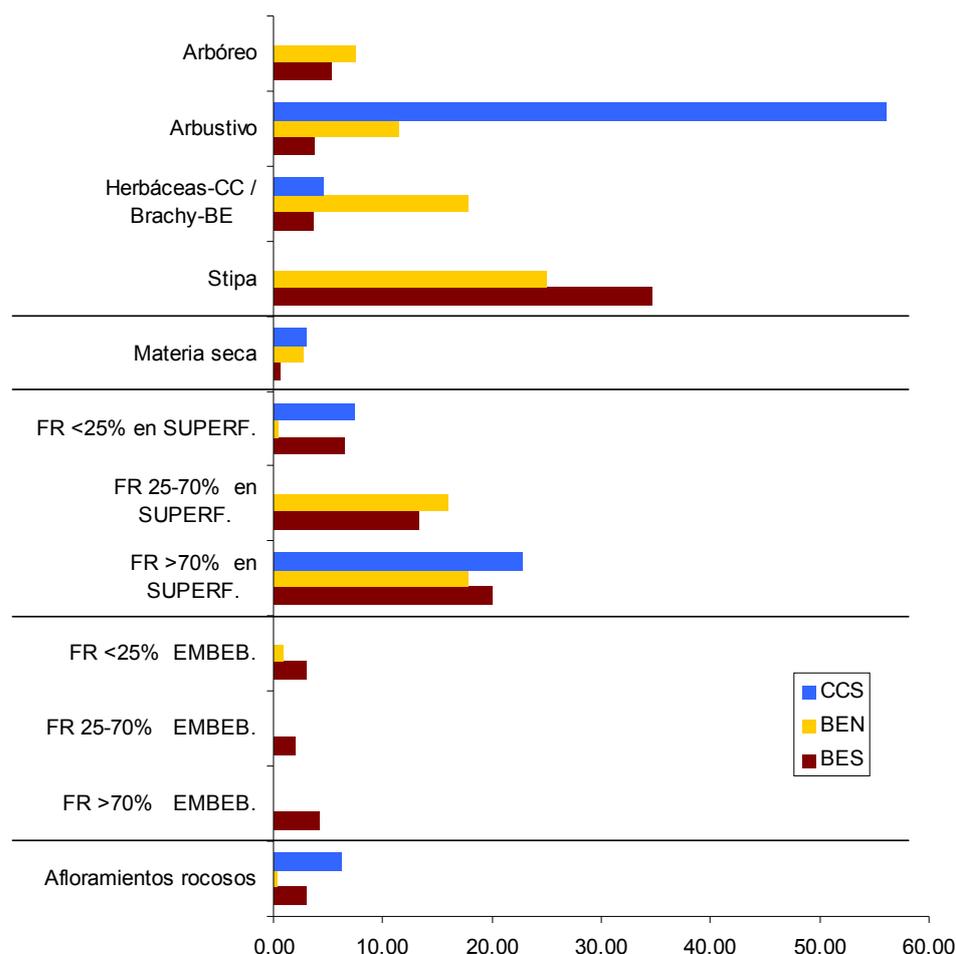


Figura 4.4 Cobertura superficial total (%) por transecto de los componentes superficiales del suelo (CSS) correspondientes a los ítems de la cartografía.

Respecto a la estructura interna de cada ladera en su **composición según tipos fisionómicos**, la cobertura de herbáceas bajas (*Brachypodium retusum*) es más abundante en las condiciones más áridas pero con orientación norte (BEN), el estrato arbustivo en la parte más húmeda del gradiente climático (CCS) y el esparto en la ladera más árida (BES) (Figuras 4.4 y 4.5a). Parece en general que a medida que se aridifican las condiciones, el sustrato herbáceo va teniendo más preponderancia en detrimento del arbustivo, y viceversa. Otra característica es que los extremos del gradiente climático (BES y CCS) presentan una composición más mono-específica, siendo la posición intermedia (BEN) la que tiene una mayor diversidad, a pesar de mantener la dominancia del esparto propia de su condición del semi-árido (Figura 4.4).

La cobertura de **materia seca** (hojarasca en BEN; anuales secas en BES y arbustos muertos en CC), se incrementa progresivamente con la precipitación anual en relación directa con el mayor grado de cobertura vegetal general (Figura 4.4).

Todos los ambientes se caracterizan por ser muy pedregosos siendo mayor la presencia de FR que de *suelo desnudo*, con un muy ligero gradiente, menos *suelo desnudo* de BES a CCS y viceversa con respecto a los FR (Figura 4.5b). Fijando la atención en la distribución de los intervalos de FR por sitio

(Figura 4.5b) se observa un gradiente de incremento de diversidad de subtipos de coberturas hacia condiciones más áridas, si bien en balance con una resultante en términos de pedregosidad global muy similares (en torno al 60%).

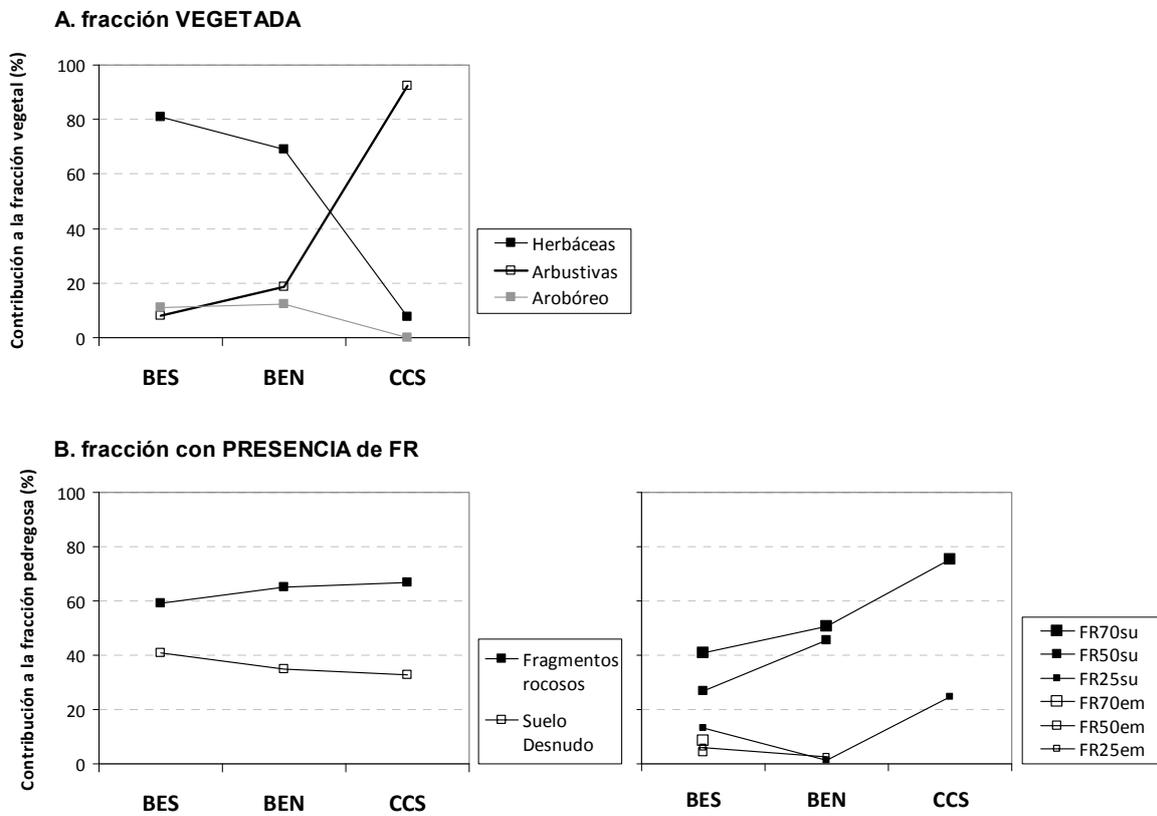


Figura 4.5 Contribución de cada grupo funcional/fisionómico a la fracción vegetal total a lo largo del gradiente climático.

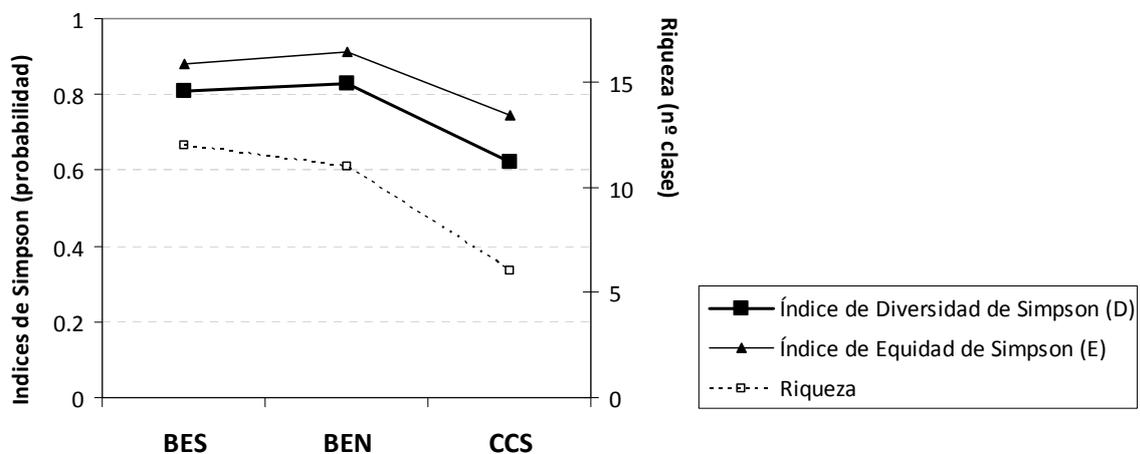


Figura 4.6 Diversidad de Simpson (D) a escala de sitio a través del gradiente climático, desagregada en su dimensión composicional (riqueza) y estructural (equidad o *evenness*).

En términos de diversidad en los CSS, calculada con el índice de Simpson (Mc Garigal, *et al.*, 2012), (Figura 4.6) el gradiente es BEN>BES>CCS, adelantándose levemente BEN sobre BES, a pesar de tener una menor riqueza de CSS, puesto que presenta una mayor equidad en la distribución de sus coberturas globales. CCS queda a la cola en diversidad, en cualquiera de sus dimensiones, riqueza y equidad, ello significa, menos variedad de subambientes, y una distribución más polarizada.

En referencia a la **similitud** en la composición de CSS entre transectos, mediante el coeficiente de Jaccard's (Jaccard, 1912) (Figura 4.7), muestra un **patrón coherente con el contraste climático entre laderas** (climático y de exposición). Donde la comparación de los dos casos de BE, con sólo diferencias microclimáticas por la exposición, muestra valores muy próximos a 1, mientras que enfrentando los dos extremos climáticos, BES y CCS se aproxima a valores en torno a 0.5, si bien en el caso de la exposición de umbría (BEN) se incrementa levemente su valor frente al de solana (BES). El índice complementario de **disimilitud** de Distancia de Bray-Curtis (Bray y Curtis, 1957) (Figura 4.7), que se fija en la riqueza y distribución de % de cobertura, muestra resultados en parte equivalentes, si bien no pone de manifiesto el segmento del gradiente correspondiente a la mejora micro-climática por efecto de la exposición, no existiendo diferencia en las en la comparación de CCS con BEN y BES. Resumiendo los índices aplicados muestran una mayor similitud entre las laderas de BE en cualquiera de sus orientaciones con mayor diversidad de subambientes a diferencia de la ladera de Cocoll.

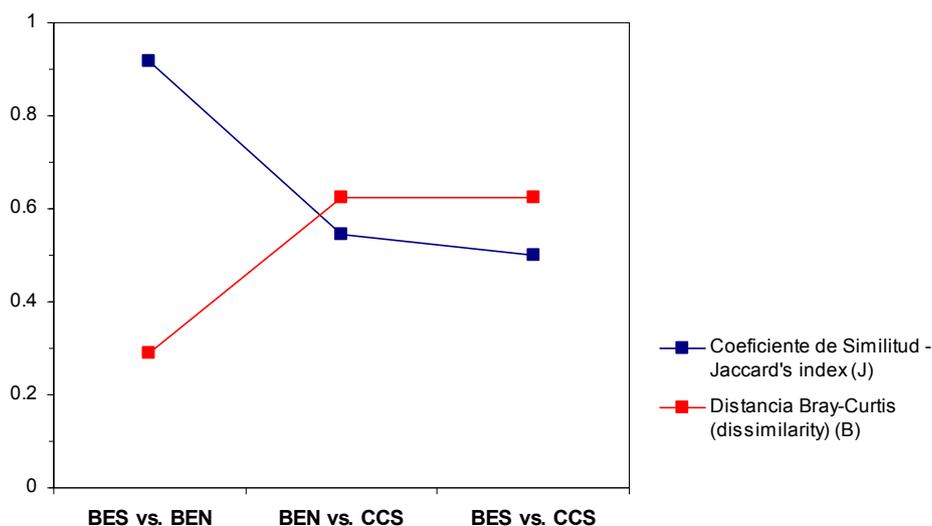


Figura 4.7 Índices globales de similitud respecto de la composición de CSS entre áreas de estudio.

4.1.1. Diagnóstico global de las condiciones de blindaje superficial de las laderas

Confrontando a nivel composicional la fase biótica (vegetación y materia seca) correspondiente al bucle orgánico, con los dos estados de blindaje superficial de la abiótica, presencia o no, en función del umbral de cobertura y posición de los FR (Figura 4.13), se observan tres escenarios contrastados en cuanto a la dispersión de los puntos, significando diferente abundancia y tipología de microambientes, con diferente grado de degradación.

En BEN existe una aglomeración de los puntos en torno al eje de vegetación (Figura 4.13) lo que significa que a un valor determinado de cobertura de vegetación, existe poca o nula probabilidad de encontrar superficies sin blindaje superficial, con un máximo en torno al 20% sin blindaje, pero siempre a la izquierda del eje principal (h), lo que significa que siempre se comporta a favor de las superficies con blindaje efectivo. Existe pues una cobertura generalizada de FR con un buen grado de blindaje, en un umbral caracterizado por la reducción de las tasas de escorrentía y producción de sedimentos, fundamentalmente.

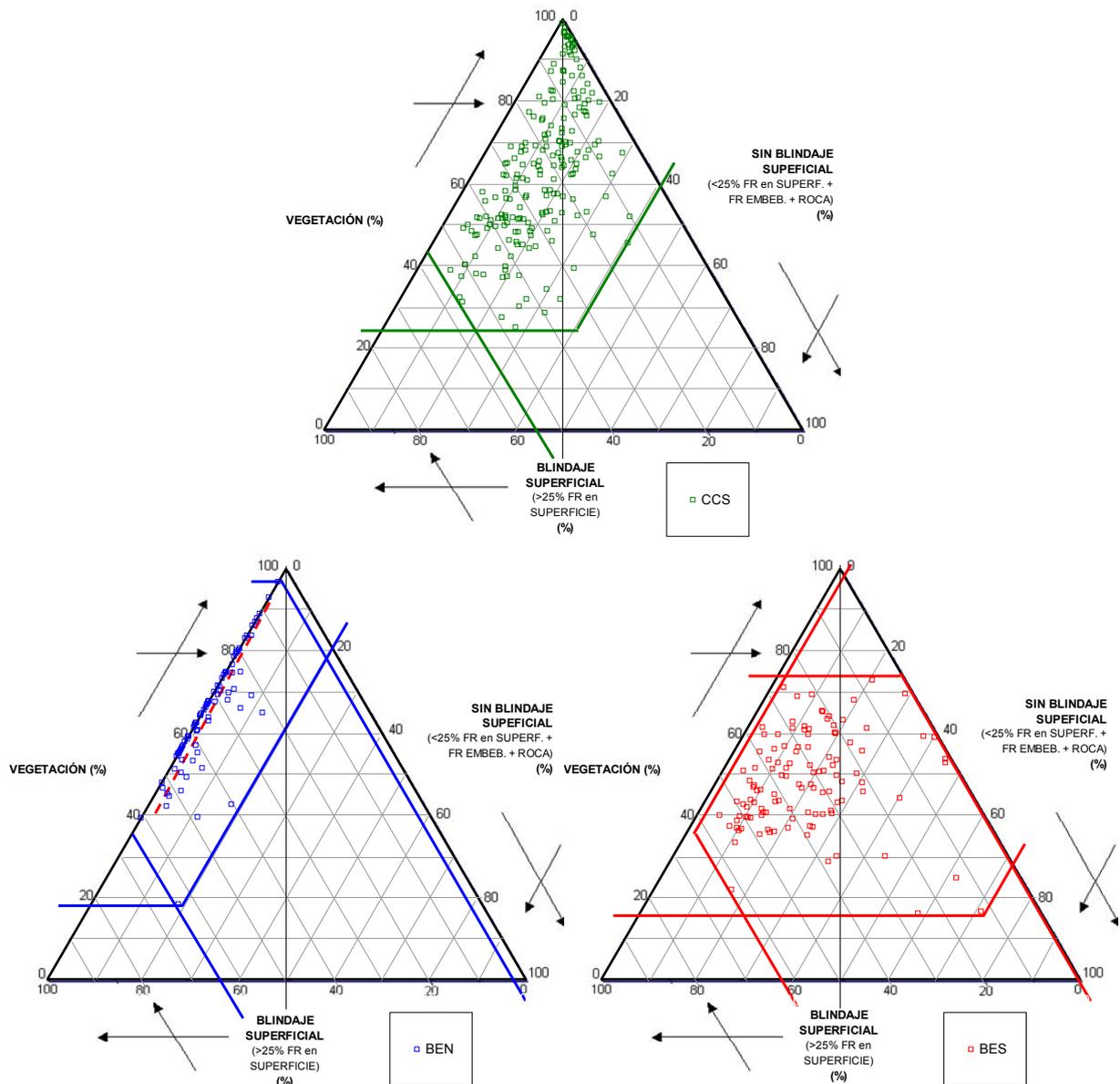


Figura 4.13 Composición por bandas de 0.5 m transversales al transecto en relación al grado de blindaje superficial. Superficies con blindaje (70FRsup + 50FRsup) frente a la superficie vegetada y otras superficies no-vegetadas sin blindaje (25FRsup; FR embebidos y afloramientos de roca madre).

CCS es la siguiente área con un mayor grado de blindaje al encontrarse su máximo de cobertura no blindada en torno al 40%. La nube de puntos se dispersa hacia la derecha, sobrepasando el eje central, especialmente en las coberturas de vegetación muy elevadas (>60%). Mientras que por

debajo de este umbral existe un predominio de puntos a la izquierda del eje, por lo que las áreas no blindadas no superan el 40% de cobertura. Esto significa que en sectores de la ladera con un mayor predominio de la vegetación, las áreas no-vegetadas tienden a presentar un menor blindaje superficial, a favor de otro tipo de superficies (desnudo o roca).

También BES presenta un grado elevado de dispersión, en comparación con BEN. Que si bien en los sectores con coberturas de vegetación intermedia (entre 40-75%) tiene un comportamiento muy similar a CCS, es en las coberturas más bajas de vegetación (hasta 20%) donde los puntos se sitúan más alejados y a la derecha del eje central (h) a favor de los microambientes sin blindaje.

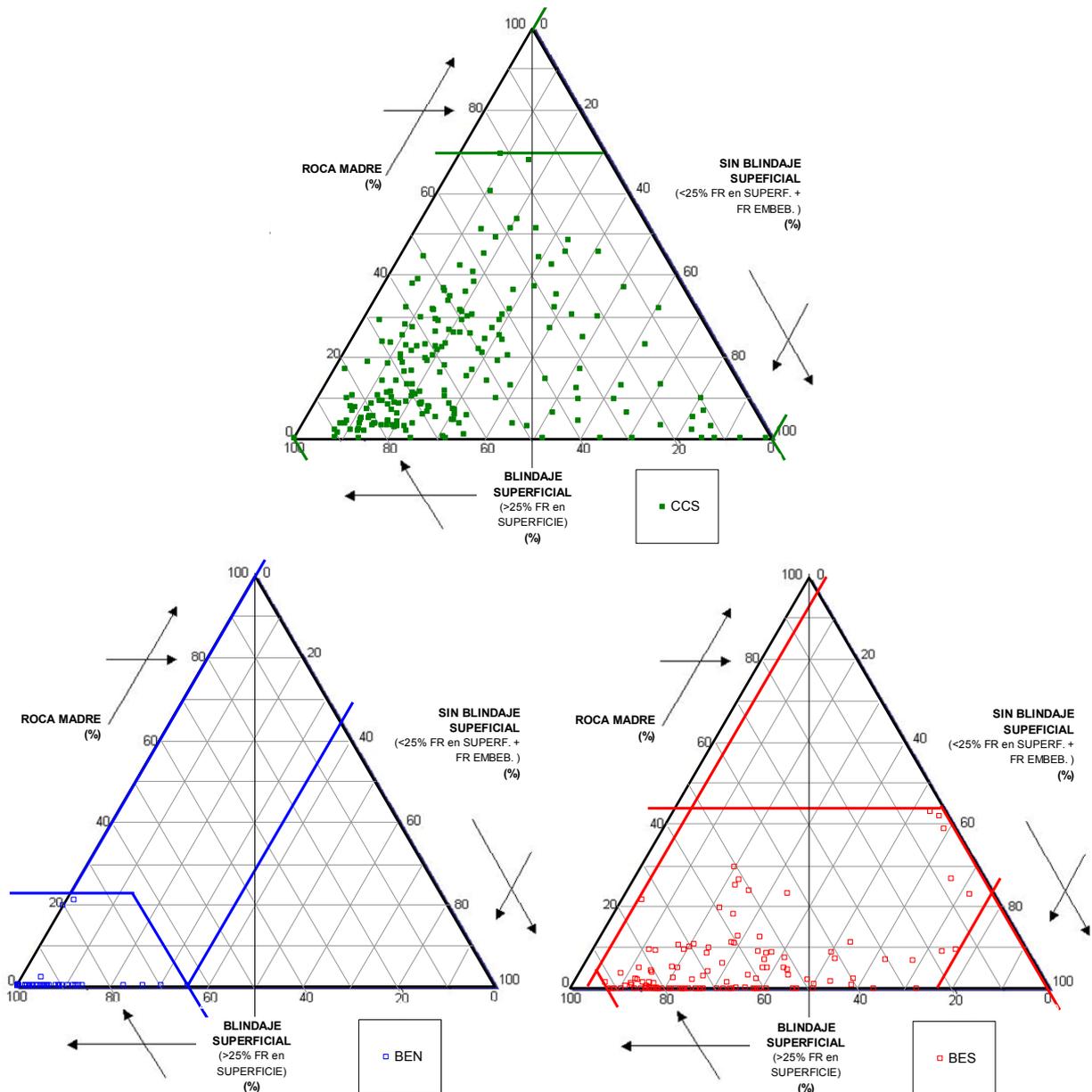


Figura 4.14 Composición de la fracción no-vegetada por bandas de 0.5 m transversales al transecto en relación al grado de blindaje superficial. Superficies con blindaje (70FRsup + 50FRsup) frente a afloramientos de roca madre y otras superficies sin blindaje (25FRsup; FR embebidos).

Para la diagnosis del estado de las laderas respecto del otro ciclo de retroalimentación, el del bucle de erosión (Figura 3.19), se fija la atención en la composición interna de la fracción abiótica (Figura 4.14), esta vez situando a los afloramientos rocosos como representantes de la variable de estado *profundidad del suelo* del bucle de erosión (ver Figura 3.19 del apartado 3.1.3.3 de metodología), que informa de manera indirecta sobre el agotamiento del recurso suelo en el perfil ante la abundancia de afloramientos rocosos. En este caso también se observa un gran contraste de situaciones entre las áreas de estudio. De nuevo BEN representa la condición general más óptima desde el punto de vista de la conservación de suelo, tanto por presentar pocos afloramientos rocosos (en torno al 20%) y de superficies no blindadas (inferior al 40%, si bien la mayoría de puntos no supera el 15%). Un elevado blindaje superficial estable debido posiblemente a una pendiente menor, y una mayor cobertura de vegetación parece estar bloqueando el bucle de erosión, limitando así el decapitado total del suelo hasta llegar a la roca madre.

BES es en este caso el área intermedia, con unos máximos de afloramientos de roca en torno a los 40%. La mayoría de puntos se sitúa a la izquierda del eje central (h, Figura 4.14), por lo que es mayoritaria la presencia de blindaje superficial, sin embargo existen microambientes con escaso blindaje (a la derecha del eje central), pero de moderada presencia de roca y elevada de superficies desnudas expuestas de erosión.

CCS es sin embargo la que observando la fracción de cobertura no vegetada, presenta una mayor degradación respecto de la pérdida o agotamiento del perfil de suelo, extendiéndose los puntos hacia arriba y hacia la derecha llegando a alcanzar valores del 70% de afloramiento de roca, y hasta el 100% de superficies expuestas y sin blindaje superficial. La dispersión de puntos, pese a presentar una mayor densidad en los subambientes favorecidos por el blindaje (a la izquierda del eje central), existe una buena dispersión también en el otro sentido (derecha del eje), lo que puede denotar un **proceso gradual** de blindaje en ausencia de cobertura vegetal, independientemente de la cobertura de afloramientos rocosos.

4.2. ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE LA HETEROGENEIDAD A ESCALA DE LADERA: PATRONES DE DISTRIBUCIÓN DE CSS EN RELACIÓN A LOS PROCESOS

Una vez conocida la **heterogeneidad en la composición de CSS** a **escala de sitio**, partimos de la hipótesis que el patrón de CSS a escala de ladera no es aleatorio y se encuentra estrechamente relacionado con los procesos de flujo superficial y transporte de sedimentos en sentido longitudinal de la ladera.

El proceso de análisis se basa en (i) la validación de la premisa inicial de anisotropía de la heterogeneidad; (ii) su constatación en términos de no-aleatoriedad en su distribución; (iii) la evidencia y caracterización de patrones espaciales de distribución y (iv) finalmente su asociación e inferencia de sub-procesos superficiales control en términos de dinámica hidro-gemomorfológica.

4.2.1. Variabilidad transversal vs. longitudinal en la distribución de CSS: test de anisotropía

Comparando la variabilidad en los porcentajes de cobertura de cada CSS por bandas de 0.5m en el patrón lateral (A) y patrón longitudinal (B) (Figura 4.8) se observa una clara dispersión del conjunto de las bandas transversales (gráficos B) (Figura 4.8) en relación al porcentaje de cobertura global de las laderas. Mientras que el análisis longitudinal (gráficos A) existe una mínima dispersión. Esto implica que cada banda de 0.5 m longitudinal reproduce en términos de cobertura global por CSS la misma variabilidad que las laderas completas analizadas. Caso contrario ocurre en el patrón lateral (gráficos B), informando sobre una distribución heterogénea de los CSS en el sentido de la pendiente. Se cumple así con la premisa de que la distribución de CSS es **direccional** o **anisotrópica** en las laderas siguiendo la máxima pendiente, claramente ligado a los de redistribución del agua y de sedimentos.

Desde el **punto de vista operativo** se cumple con la condición previa de que el ancho de los transectos seleccionados no recoge una variabilidad lateral del *continuum* de la ladera completa, pudiéndose considerar cada banda longitudinal de 0.5 m (resolución considerada óptima para el análisis) como **réplica** una de otra, y **representativa del carácter general** del transecto completo, especialmente en lo referido a la interpretación de procesos.

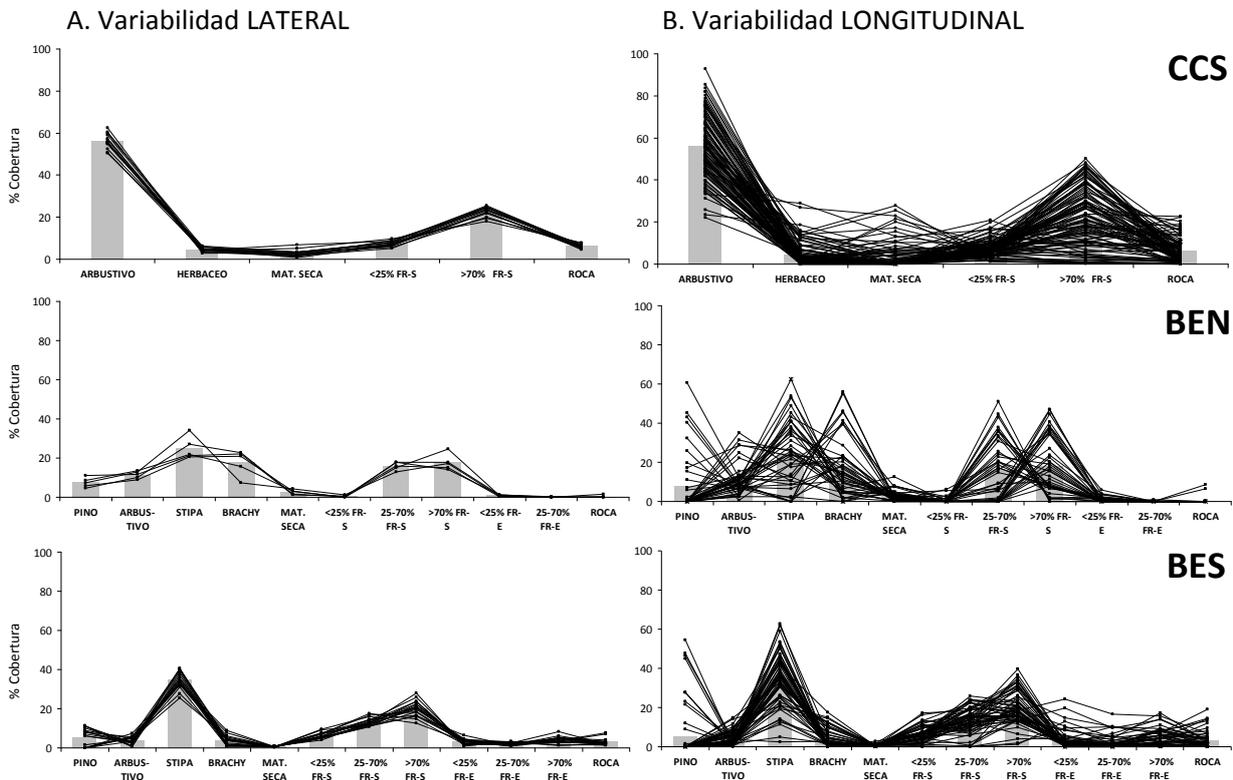


Figura 4.8 Test de anisotropía en la distribución de CSS en sentido (A) lateral vs. (B) longitudinal a partir de los porcentajes de cobertura en bandas de 0.5m de anchura. A: patrón lateral (análisis bandas longitudinales); B: patrón longitudinal (análisis bandas transversales).

4.2.2. Caracterización de la heterogeneidad en la composición a escala de ladera: diversidad de CSS en función de la posición en el transecto

Al igual que a escala de sitio se han identificado pautas de distribución de los CSS que atienden al gradiente climático propuesto, a escala de ladera es la posición a lo largo del transecto la variable fundamental que determina la distribución de los CSS. Cabe esperar por lo tanto que su distribución en esta componente direccional no sea homogénea ni aleatoria (i.e. señal de ruido blanco, ver apartado 3.1.3.2 de la metodología).

Las **medias del índice de diversidad** (Figura 4.9) por transecto deladera completo siguen ahora el gradiente BES>BEN>CCS. BES se adelanta así a BEN, aunque presentan valores muy similares en torno a 9, mientras que en el cálculo global por sitio (Figura 4.6) era a la inversa, lo que denota un acercamiento de estos subambientes respecto de su estructura interna del transecto.

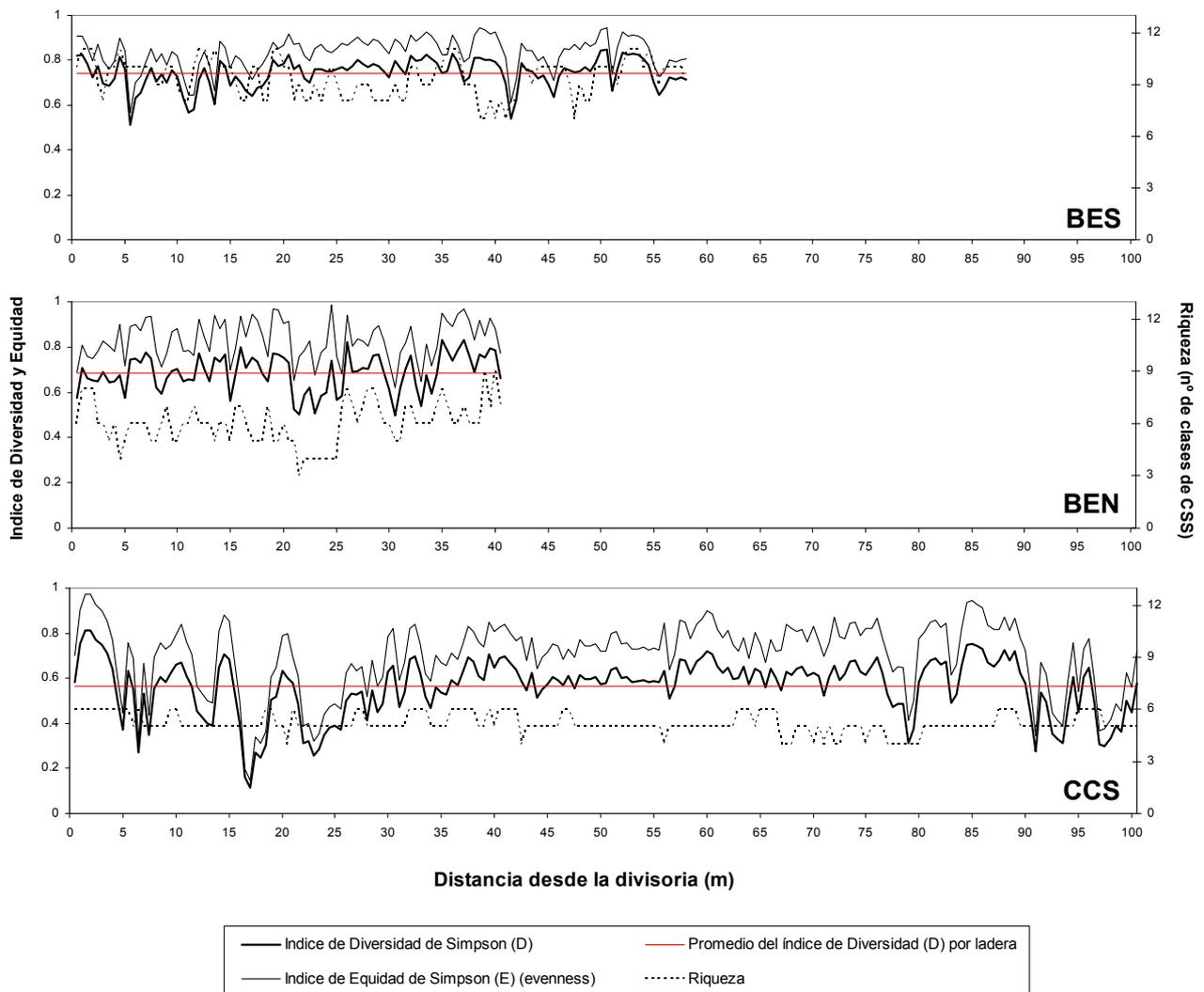


Figura 4.9 Distribución de la diversidad de componentes superficiales del suelo (CSS) a lo largo de cada transecto (bandas transversales de 0.5 m), desagregada en su dimensión composicional (riqueza) y estructural (equidad o *evenness*).

En todos los casos se evidencia una fluctuación más o menos pronunciada en torno a la media (Figura 4.9 y Tabla 4.2-general), lo que denota unos ambientes con una marcada heterogeneidad a cortas distancias (escasos metros), lo cual puede traducirse en términos de tamaño de grano, y además relacionarse con la estructura espacial en mosaico característica del medio mediterráneo, asociada ésta con la dinámica fuente-sumidero en términos de funcionamiento hidrológico. Sin embargo, para la interpretación de estas oscilaciones, hay que tener presente que la resolución del análisis es de 0.5 m, y una reducción en la amplitud de las oscilaciones, puede representar tanto una mayor homogeneidad en la composición de CSS como una tamaño de grano todavía más pequeño, y por tanto homogeneizándose la señal del patrón.

Tabla 4.2 Índice de diversidad de CSS por transecto a escala global y por sectores identificados previamente mediante análisis visual (ver Figura 4.9). (1) Media \pm Desviación típica; (2) Promedio de las desviaciones estándar calculadas con diferentes tamaños de ventana móvil (3, 2 y 1 metros).

	General ⁽¹⁾	Variación móvil ⁽²⁾		
		3 m	2 m	1 m
BES	0.74 \pm 0.06	0.05	0.04	0.03
sector 1	0.70 \pm 0.07	0.06	0.06	0.04
sector 2	0.77 \pm 0.02	0.03	0.02	0.02
sector 3	0.74 \pm 0.06	0.05	0.05	0.03
BEN	0.68 \pm 0.08	0.07	0.06	0.05
sector 1	0.68 \pm 0.06	0.06	0.05	0.04
sector 2	0.68 \pm 0.09	0.07	0.07	0.05
CCS	0.56 \pm 0.12	0.07	0.06	0.05
sector 1	0.51 \pm 0.15	0.10	0.09	0.06
sector 2	0.61 \pm 0.05	0.04	0.04	0.03
sector 3	0.53 \pm 0.14	0.10	0.08	0.06

A este respecto, la ladera con un patrón de fluctuación más homogéneo es BEN, en contraste con BES y CCS que presentan una clara zonificación del transecto (Figura 4.9) en los que se diferencian tres sectores: ambos extremos (i.e. parte alta y baja) con una mayor oscilación y con una parte central más estable con menores oscilaciones en torno a la media. En BEN, sin embargo, se intuye un cambio en la intensidad de las oscilaciones en torno a mitad del transecto. Estos sectores que se identifican *de visu* en la figura 4.9, se confirman numéricamente promediando las fluctuaciones locales de los valores del índice hasta en tres entornos, de 3, 2 y 1 m de alcance (ventana móvil, Tabla 4.2).

Por el marcado contraste y relevancia del diferente control abiótico y biótico en los procesos hidrogeomorfológicos, en la Figura 4.10 se desagrega el análisis de la diversidad según estos dos dominios.

Respecto al comportamiento en el **dominio biótico** (Figura 4.10), la ladera BEN presenta la mayor diversidad generalizada a lo largo de todo el transecto, manteniéndose prácticamente siempre en torno a la media (patrón de distribución más homogéneo). En contraste se encuentra la ladera de CCS, que presenta una diversidad más fluctuante, además de ser más reducida en términos de promedio, esto debido a la marcada dominancia de los arbustos respecto de las herbáceas y materia seca. BES se encuentra en una posición intermedia, con zonas donde la diversidad es máxima, notablemente superior a la media (zona media y baja fundamentalmente) y con zonas de una

notable dominancia, prácticamente mono-específica (zona alta). Se destaca en esta ladera, como con el retroceso del % de cobertura de vegetación se produce un simultáneo avance de la diversidad (alternancia de las curvas del índice de diversidad y de la diferencia abiótico-biótico, (ver Figura 4.10).

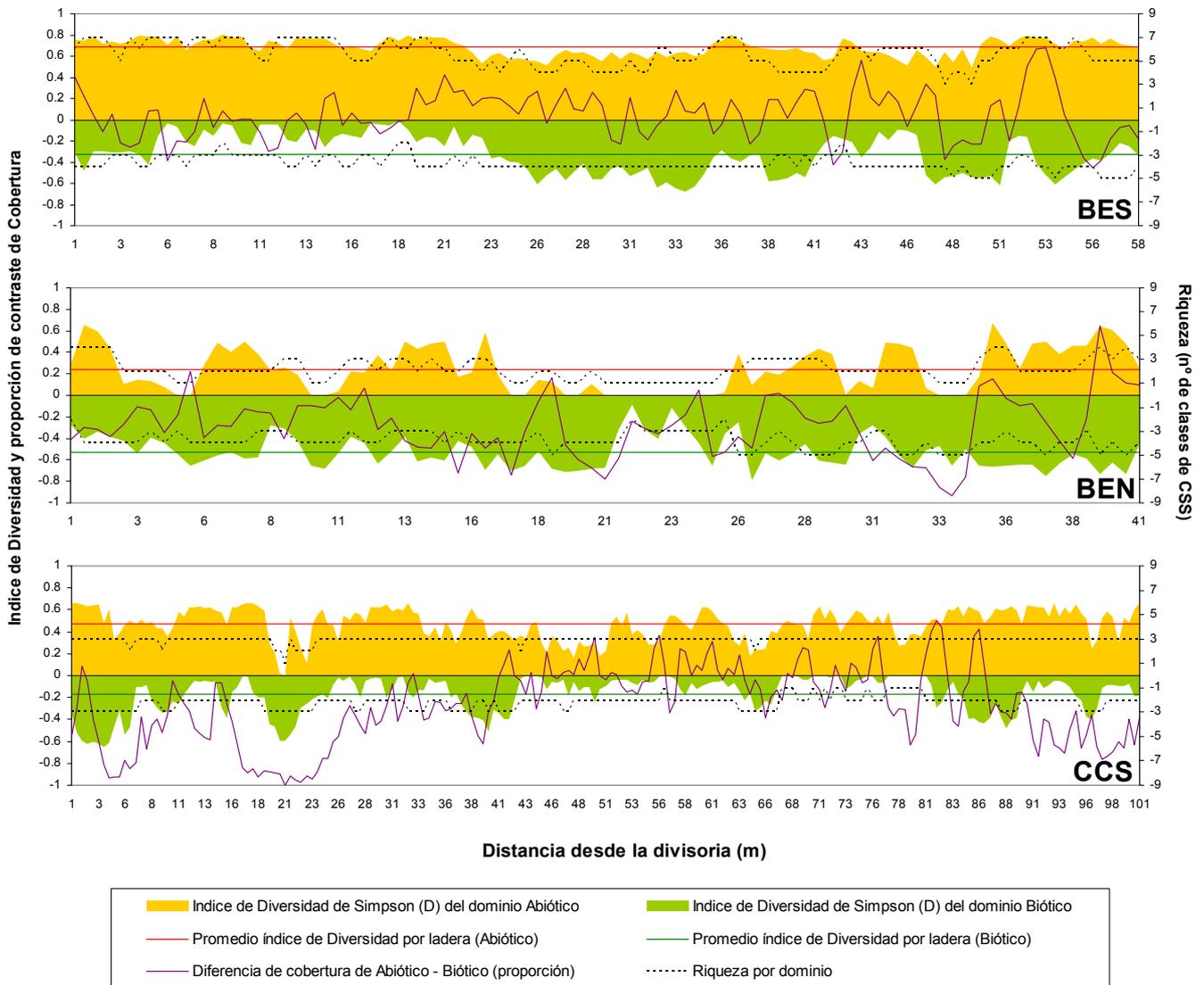


Figura 4.10 Distribución de la diversidad de componentes superficiales del suelo (CSS) a lo largo de cada transecto (bandas transversales de 0.5 m), desagregado en el dominio abiótico y el biótico.

El dominio abiótico sigue una tendencia en buena parte inversa a lo que ocurre en el biótico. Aquí BES es la ladera que presenta una mayor diversidad de subambientes, de forma generalizada y mantenida a lo largo de todo el transecto, a pesar de que se observa una mínima disminución hacia las zonas media y media-baja (Figura 4.10), coincidiendo este descenso con las zonas donde predomina la cobertura abiótica (i.e. pérdidas de cobertura en la vegetación) pero donde también aumenta la diversidad de la vegetación, y por tanto donde el esparto pierde preponderancia. BEN es el menos diverso en la componente abiótica aunque con una mayor oscilación siendo frecuentes los espacios con una diversidad 0 (un único tipo de CSS). La ladera de CCS se sitúa en una posición intermedia de diversidad, tanto en magnitud respecto al resto de laderas, como en distribución, oscilando en torno a la media, aunque en la parte central baja.

4.2.3. Patrones de distribución de CSS: aleatoriedad de la heterogeneidad

Abordamos la cuestión de la **no-aleatoriedad** en la distribución de CSS comprobando si las formas responden a unos procesos subyacentes que gobiernan su distribución espacial.

La Figura 4.11 da una visión general de la distribución longitudinal de cada CSS por sitio, mostrando una gran variabilidad entre los diferentes CSS y las diferentes áreas de estudio. En la práctica totalidad de los casos se observa a simple vista un patrón o tendencia general de distribución a lo largo del transecto, pero también una alternancia o fluctuación de una mayor frecuencia a un intervalo espacial mucho más reducido, lo que parece apuntar a una no-aleatoriedad generalizada en todos los casos.

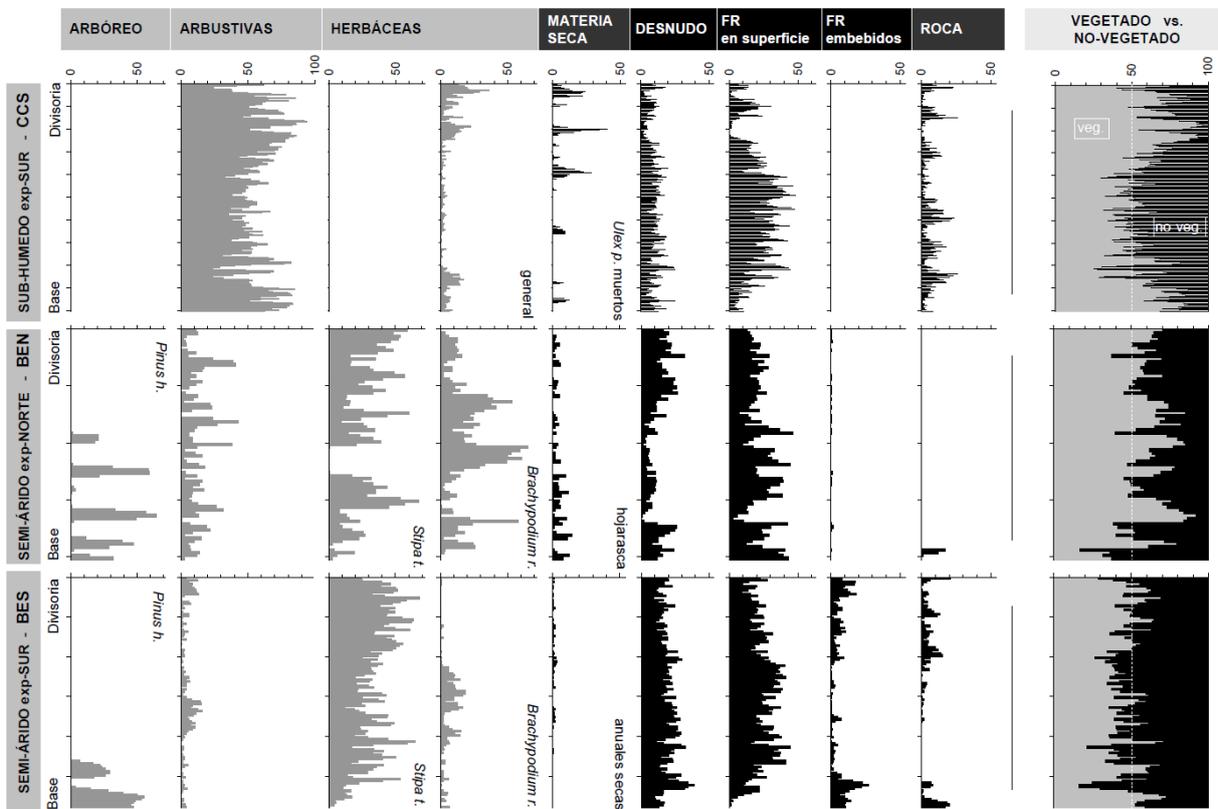
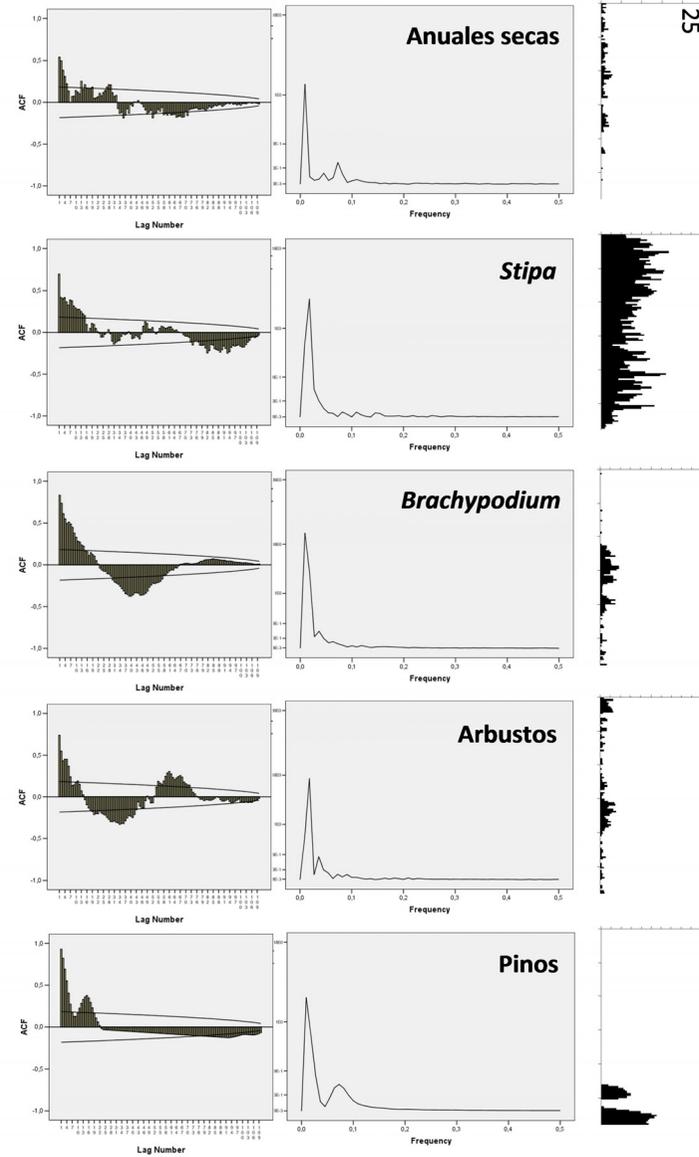
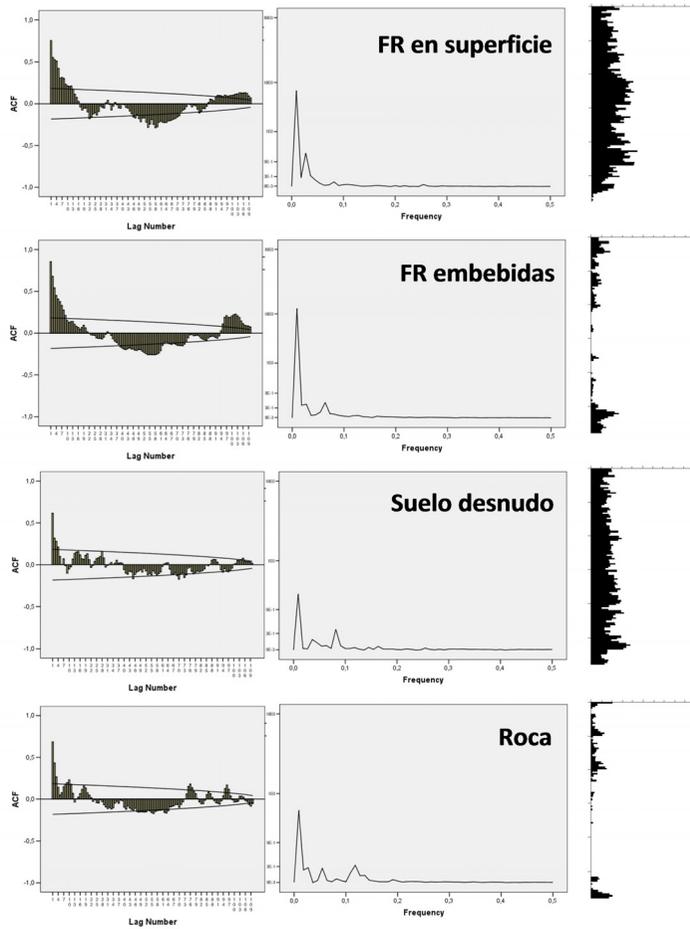


Figura 4.11 Porcentajes de cobertura de componentes superficiales del suelo (CSS) en bandas transversales de 0.5 m de ancho, desde la divisoria del transecto a la base de la ladera.

De los resultados del análisis de Series Temporales mediante la combinación de la *función de autocorrelación* y el *análisis espectral* (*autocorrelograma* y *periodograma* respectivamente, en la Figura 4.12), junto al entrenamiento para su interpretación en términos de patrones espaciales presentado en el apartado de Metodología (ver Figura 3.18) se **constata la no-aleatoriedad** en la distribución para todos los CSS en todas las áreas de estudio. Si bien la señal o intensidad de los patrones es variable, diferenciándose en unos casos unas pautas de regularidad más marcadas que en otros (altura de los picos máximos relativos de los periodogramas).

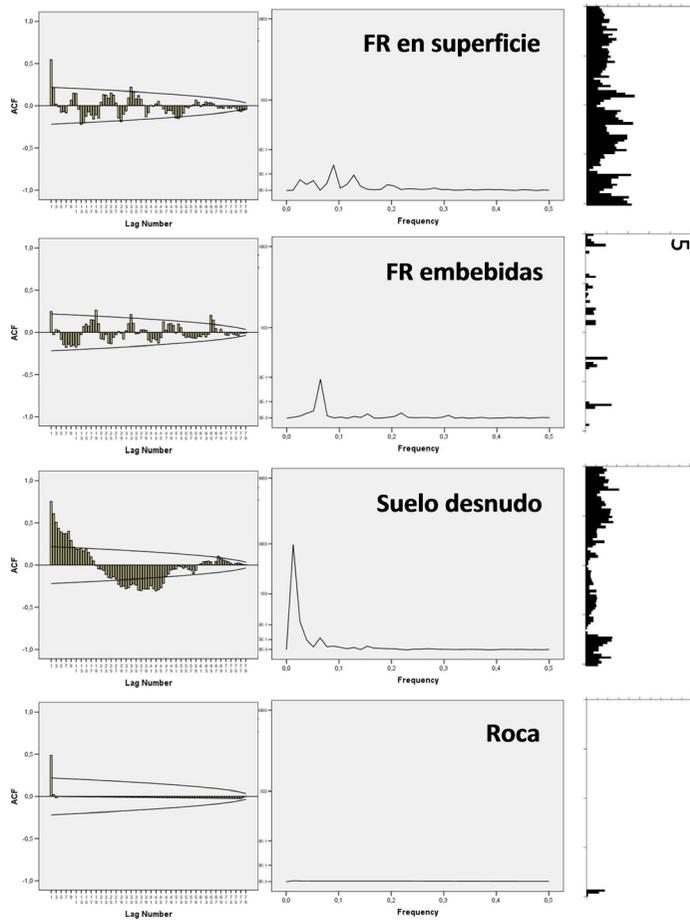
BENIDORM SUR [BES]



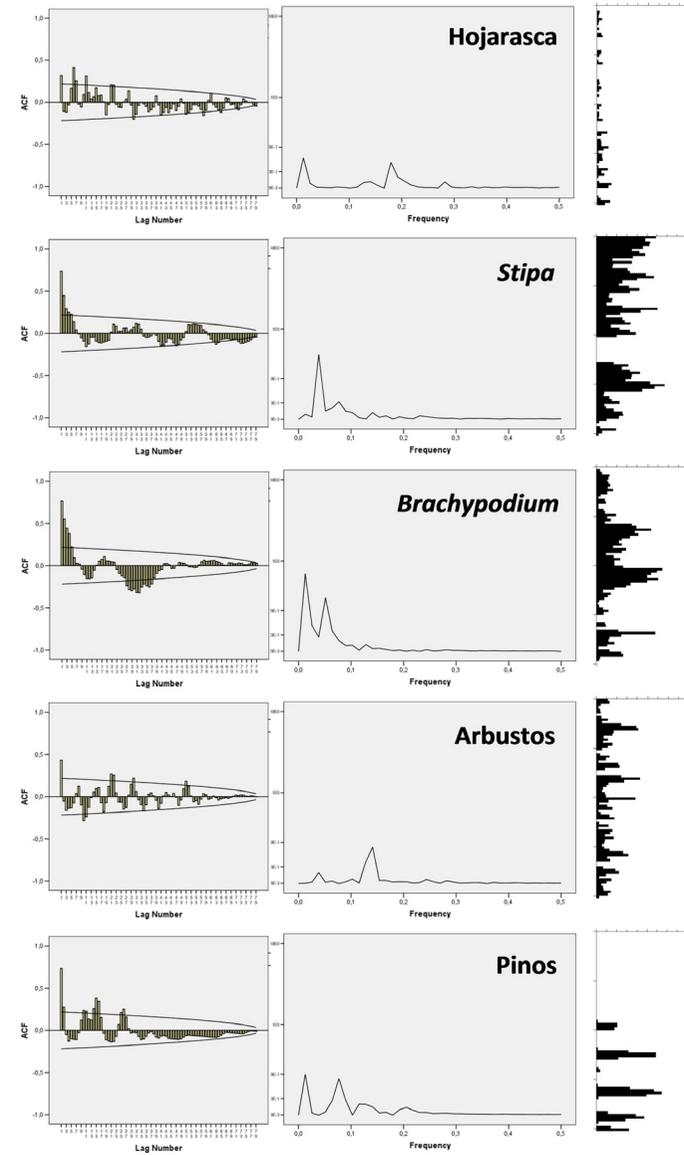
25

BENIDORM NORTE

[BEN]



5



COCOLL [CCS]

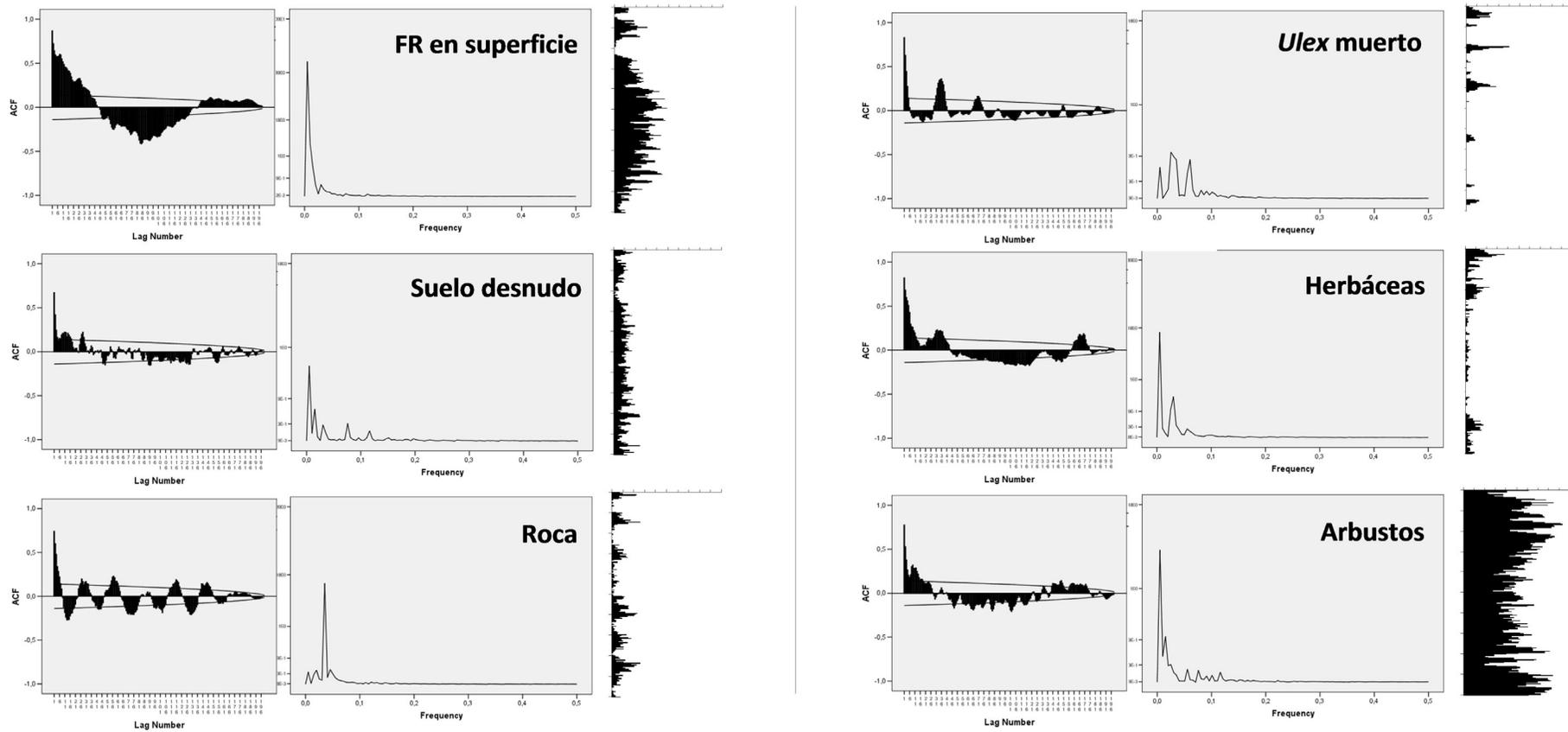


Figura 4.12 Análisis de Series Temporales (TSA) por componente superficial del suelo (CSS) y por ladera. De izquierda a derecha, en cada grupo: Autocorrelograma, análisis espectral (periodograma) y porcentaje de cobertura de cada CSS.

Se muestra en la Tabla 4.3 la identificación de los picos de frecuencia que resaltan en los *periodogramas*, ya transformados a periodos (inversa de la frecuencia, unidad en metros), que corresponde con los diferentes intervalos espaciales en los que se identifican ciclos repetitivos del patrón de CSS, en algún grado (i.e. altura relativa del pico). Se observa que es frecuente que existan diferentes ciclos para un único CSS, aunque en diferentes rangos. Lo que significa que de la descomposición de la señal (secuencia % de cobertura de CSS) es posible identificar diferentes niveles de periodicidad. Además se observan periodos coincidentes en algunos de los CSS en una misma ladera, lo que traducido en términos de procesos, implica diferentes niveles de escala o entornos de interacción de distintos CSS.

Tabla 4.3 Resumen de periodicidades representativas para cada CSS y área de estudio. Corresponden a los picos máximos de frecuencia extraídos de los periodogramas correspondientes. Periodo = 1/Frecuencia.

		+ —————→ PERIODO PICOS (m) ←————— -							
dominio ABIÓTICO	Roca madre	BES	18.5		9.1		4.2		
		BEN							
		CCS	14.3						
	FR en superficie	BES	18.5		6.1				
		BEN	19.2		9.8		5.6		3.9
		CCS	16.7						
	FR embebidos	BES	18.5		7.8				
		BEN			7.8				
		CCS							
	Suelo desnudo	BES			13.9		6.1		
BEN				7.8					
CCS		33.3	16.7			6.6	4.3		
dominio BIÓTICO	Materia seca	BES			11.1		6.8		
		BEN					3.5		2.8
		CCS	20.0		8.2				
	Herbáceas/ <i>Stipa</i>	BES			6.1		4.6		3.4
		BEN			13.2		6.5		3.5
		CCS	16.7		8.9				
	<i>Brachypodium</i>	BES			13.9		7.8		
		BEN			13.2		9.8		4.9
		CCS					4.9		3.9
	Arbustos	BES			13.9		6.8		5.5
BEN						6.6		4.3	
CCS		33.3	16.7	8.9		6.6		4.3	
Pinus	BES					6.8			
	BEN					6.5		4.3	
	CCS							2.4	

A partir de la descomposición de la señal (coberturas) de cada CSS se han obtenido diferentes periodicidades características (Tabla 4.3), la cuales acotan diferentes distancias a las que los CSS fluctúan su presencia y abundancia. Si además las respuestas individuales se contrastan con las de los CSS que comparten periodicidad característica, se consigue el marco de interrelación entre ellos, pudiendo observar su tendencia de asociación (Tabla 4.4 y Figuras 4.15, 4.17 y 4.19).

Esta co-ocurrencia, periodicidad o co-correspondencia puede manifestarse bien en términos de (i) co-existencia o simultaneidad, cuando sus trayectorias son armónicas y descienden y aumentan de forma conforme; (ii) bien de forma antagónica, en la que dos CSS muestran sus trayectoria inversas, no coherentes o en cierto grado de competencia, en la que la presencia de uno merma la del otro (señales alternas) o (iii) bien el caso intermedio, en que las trayectorias presentan concordancia pero con cierta demora (desfase) una respecto de la otra, lo que puede estar marcando algún grado de

interdependencia o de secuencialización espacial, por lo que también es relevante el orden de aparición (Tabla 4.4).

Tabla 4.4 Síntesis de ocurrencia de periodicidades y asociación entre CSS en cada nivel de periodicidad. El nivel (1/n) se define por el número aproximado de ciclos resultante en cada ladera determinada en función de su longitud y orden de magnitud del periodo. La co-ocurrencia entre diferentes CSS se valora en términos de correspondencia (gris), antagonismo (rojo) y demora (azul). Cuando procede se establece un CSS de referencia del que el resto de CSS depende.

		BES						BEN								CCS									
		Con.	1/1	1/3	1/4	1/7	1/9	1/17	Con.	1/1	1/2	1/3	1/4	1/5	1/6	1/10	1/11	Con.	1/1	1/3	1/5	1/6	1/7	1/11	1/15
dominio ABIÓTICO	Roca madre																								
	FR en superficie																								
	FR embebidos																								
	Suelo desnudo																								
dominio BIÓTICO	Materia seca																								
	Herbáceas/ <i>Stipa</i>																								
	<i>Brachypodium</i>																								
	Arbustos																								
	Pinus																								

■ antagonista ■ demora X CSS de referencia

Es importante señalar que en cada periodo hay que valorar el sentido de la co-correspondencia descrita anteriormente según la extensión o escala a la que se produce (nivel), por lo que los periodos de mayor longitud estarán señalando hacia sectores o tramos de co-ocurrencia, mientras que a medida que nos aproximamos a la escala de parche las fluctuaciones apuntan en el sentido de las interdependencias entre CSS.

4.2.4. Dinámica de distribución de CSS relacionada con procesos eco-hidro-geomorfológicos: Análisis proceso-patrón

Una vez obtenidos los periodos de aparición representativos en la distribución de cada CSS (Tabla 4.4) a partir de los periodogramas del análisis de Series Temporales (Figura 4.12), y siguiendo la guía de interpretación de autocorrelogramas disponible en el apartado 3.1.3.2 de metodología (Figura 3.1.10), se dispone a presentar por cada área de estudio la casuística particular de los transectos de ladera. Se ha construido para ello un gráfico de apoyo a la interpretación de los patrones (Figuras 4.15; 4.17 y 4.19) que traduce, mediante la sectorización de los transectos, la periodicidad presente en cada nivel (1/n), mostrando además las trayectorias del % de cobertura de cada CSS implicado en cada nivel a lo largo del perfil. Además, para la interpretación de procesos, se acompaña para cada ladera otro gráfico de distribución de cobertura de los diferentes CSS agrupados y dispuestos en función de su traducción en clave de blindaje superficial (ver Figuras 4.16; 4.18 y 4.20).

De la combinación de ambos tipos de gráficos, se pretende profundizar en la lógica de distribución y secuenciación de CSS en sentido del flujo. Siendo especialmente interesante la detección de diferentes patrones de configuración a lo largo de todo el transecto, y llegar así a delimitar diferentes

tramos de ladera o *sectorización*, los cuales se intentan interpretar en términos de génesis y procesos eco-hidro-geomórficos activos actuales.

4.2.4.1. *Caso de Benidorm Sur (BES): extremo semi-árido del gradiente climático. Interpretación geomorfológica.*

En el nivel de periodicidad de ladera completa (1/1) se registran dos modelos fundamentales de distribución que afectan a la práctica totalidad de los CSS (Figura 4.15-A). Por un lado una que podemos denominar de *trayectoria cóncava*, en la que la relativa abundancia de cada componente experimenta un descenso significativo hacia la parte media de la ladera, y esto ocurre con la roca, el esparto y los FR embebidos. En contraposición está la *trayectoria convexa*, que afecta al suelo desnudo, los FR en superficie, el *Brachypodium* y los arbustos. Esto nos informa de que existe cierta dualidad de subambientes según la presencia de un grupo u otro de CSS. Además, la materia seca y los pinos muestran un modelo *concentrado*, que se caracteriza por aparecer únicamente en algún sector concreto de la ladera, manteniéndose totalmente ausentes en el resto. Los Pinos aparecen únicamente al pie de la ladera, y la materia seca (anuales muertas) en los dos tercios superiores.

En el segundo nivel (1/3) (Figura 4.15-B), destacan la roca y los FR, tanto en superficie como embebidos. Se observa un cierto antagonismo entre la mayor presencia de FR en superficie con la relativa disminución de los otros dos CSS; roca y FR embebidos muestran un elevado grado de co-existencia. Destaca la manera como evoluciona la demora de uno frente al otro a lo largo de la ladera. En el sector superior, más próximo a la divisoria, la secuencia comienza con la Roca, seguido de la onda de FR embebidos, en la parte central se armonizan simultaneándose, para por último en la parte baja la demora se invierte, apareciendo los FR embebidos antes que los afloramientos de roca madre, en el sentido de la pendiente.

En el siguiente nivel (1/4) (Figura 4.15-C), aparecen el suelo desnudo, *Brachypodium* y arbustos, que si bien se observa una buena correspondencia entre los dos últimos, en ocasiones se observa cierta demora del *Brachypodium* respecto de los arbustos. Sin embargo el suelo desnudo parece llevar una dinámica más independiente.

Reduciendo el nivel (1/7) (Figura 4.15-D) aparecen el *Brachypodium* y los FR embebidos, los cuales presentan una clara alternancia, y por lo tanto un asociación antagónica, lo que es indicio de que los microambientes con presencia de FR embebidos no son una condición favorable para el establecimiento de esta herbácea más exigente.

Ya en un nivel que podríamos considerar en el ámbito de la escala de *stand* (1/9, en torno a los 6 m) (Puigdefábregas, 2005) (Figura 4.15-E), los FR en superficie y la *Stipa* son antagónicos. Los FR aparecen asociados con el suelo desnudo. Esta distancia de periodicidad encapsula las fluctuaciones a menos escala a modo de paquetes o entornos de variación semejantes internamente, esto es, a tramos que definen una secuenciación de meso-ambientes diferentes. Esto denota una elevada variabilidad en las condiciones de co-existencia a lo largo del transecto, que se traduce en diferentes manifestaciones *fuelle-sumidero* o patrones de espaciales suelo-vegetación heterogéneos.

En el nivel de periodicidad inferior (1/17, 3.5 m aprox.) (Figura 4.15-F) ya sólo aparece la *Stipa* representada, donde los pulsos ya se identifican con tramos más homogéneos de cobertura, de algún modo denotando cierta distribución en bandas transversales a la ladera.

Lo arriba expuesto nos informa sobre la diferenciación de subambientes o sectores en varios niveles de resolución o escala espacial dentro de una misma ladera. Para la inferencia de subprocesos, aunamos estos resultados a la información que se aporta si observamos la distribución de los diferentes grupos funcionales de CSS bajo la perspectiva del blindaje superficial (Figura 4.16).

En términos de ladera, la **cobertura de vegetación** experimenta una leve pero progresiva disminución (Figura 4.16), partiendo en el primer tercio del transecto (desde la divisoria) con pequeñas fluctuaciones en torno al 50%, descendiendo en la parte media los picos mínimos, para en el último tercio experimentar unas fluctuaciones de mayor amplitud. Lo que significa que a medida que descendemos por la ladera, el dominio abiótico va ganando relevancia frente al biótico.

Observando la Figura 4.16, podemos establecer cinco sectores de ladera, que describimos de manera individualizada por orden secuencial.

El **primero la franja proximal a la divisoria, Sector I (0-5 m)**, que arranca con baja cobertura vegetal (30%) y elevada presencia de afloramientos de roca (20%), donde además la fracción de espacios con pedregosidad (Figura 4.16-arriba) está en una situación de equidad entre los CSS catalogados como de blindaje superficial (>25FRsup) y los que no (<25FRsup y todos los intervalos de FRemb). Todo esto es síntoma de un lugar en fase de degradación, por su escaso blindaje superficial y con pérdida de suelo, hasta el afloramiento de la roca madre. Esta banda de divisoria, sin posibilidad de recibir sedimentos, es una franja de evacuación neta de sedimento. En este contexto se aprecia una clara dominancia del esparto, si bien con una presencia significativa de Arbustos con respecto a otras partes de la ladera (en torno al 20%).

El **siguiente tramo, Sector II (5-21 m)** muestra, en términos de cobertura vegetal, menor amplitud de las fluctuaciones, oscilando en torno al 50%, y es el sector con mayor dominancia de esparto, y con 10% de cobertura de arbustos, aunque con una escasez significativa de herbáceas *Brachypodium*, pese a su progresivo y ligero aumento ladera abajo. La presencia de afloramientos rocosos es también significativa, llegando casi al 20%. En la fracción de suelo con pedregosidad (Figura 4.16-A), también las superficies sin blindaje son abundantes observándose un progresivo decaimiento de los FR embebidos, a favor de las áreas de baja cobertura de FR (25FRsup). La presencia de superficies blindadas domina en todo el sector, siempre con una mayor prevalencia en el rango de 70FRsup. Aunque en el tramo final de este sector, unido al incremento de superficies 25FRsup también lo hace la proporción de 50FRsup., lo que sin embargo no se traduce en un descenso de la cobertura global de FR en superficie (Figura 4.15), más bien un aumento, pues en este subtramo final (hacia el metro 20) también se produce un decaimiento de la cobertura vegetal.

Este sector se traduce en términos de procesos como un área donde las macollas de esparto colonizan un suelo muy degradado, donde en los parches de suelo desnudo, entre espartos, se sucede una secuencia de tramos sin blindaje superficial, muy erosionables y tramos (50FRsup) con

menos suelo expuesto a impacto de las gotas de lluvia y la escorrentía, y de suelo ya blindado (70FRsup) en el que las tasas de producción de sedimentos son muy bajas, con ondas de avance diferente de las concentraciones de FR, en función de la longitud del tramo entre plantas. En esta secuencia, las macollas de esparto ejercen de barrera a la arroyada, permitiendo la formación de montículos (Figura 4.15, periodo 1/9). Los afloramientos de roca madre constituyen áreas donde se ha agotado el perfil de suelo. Esto se evidencia por la secuenciación identificada en la Figura 4.15, periodo 1/3.

Los **siguientes sectores (III y IV; 21-35 m y 35-49 m)** se caracterizan ambos por una progresiva disminución de afloramientos de roca y de FR embebidos (Figura 4.16). Además se registra una pérdida importante en la dominancia relativa del esparto, con el aumento considerable de *Brachypodium* y de arbustos, evidenciando un cambio considerable de microambiente para el desarrollo de la vegetación. Las implicaciones para los procesos en términos de balance hidrológico no se conocen, pero sí en incremento de la infiltración puntual. Un mayor espesor de suelo generalizado, con un contenido extra de la fracción fina en un área de la ladera dónde antiguamente (>75 años) hubo un par de terrazas agrícolas de las que apenas quedan vestigios (creo que en el apartado de usos de suelo de mi tesis pone algo de eso), podría estar en la base de este cambio de microambiente eco-hidrológico. Se trata pues de una banda central de amortiguación (*zona buffer*) de la onda erosiva a lo largo del transecto de ladera, en la que la remoción de suelo es suplida por materiales provenientes de los sectores superiores (I y II, Figura 4.16).

En esta franja central se evidencia asimismo un cambio progresivo en la presencia de CSS, que informa sobre los procesos activos. En el primer **subtramo, Sector III (21-35 m)** se observa un progresivo avance de la proporción de *Brachypodium* en detrimento del esparto en la primera mitad, hasta que al final se produce el nuevo avance de arbustos, sin apreciar en el subtramo variaciones en la tendencia de cobertura general. A la vez que se produce una reducción de la proporción de superficies 70FRsup a favor de las 50FRsup, especialmente en la segunda mitad del subtramo cuando los arbustos recolonizan el espacio, manteniéndose sin embargo estable la proporción de suelo desnudo.

En esta zona a medida que las condiciones de acumulación de sedimentos irían avanzando progresivamente ladera abajo (i.e. reducción gradual de los afloramientos rocosos), el esparto iría retirándose progresivamente para ser sucedido por *Brachypodium*, el cual precisa de una condiciones microambientales de suelo y humedad más favorables. Así hasta llegar a un máximo de cobertura de *Brachypodium*, donde la proporción de 70FRsup se mantiene estable y elevada, puesto que la fisonomía y patrón de colonización del espacio del *Brachypodium* dificulta la movilización de FR ladera abajo, alcanzándose una condición relativamente estable de blindaje superficial. Esto refuerza la idea de que las superficies de 50FRsup son áreas de relativa migración de FR.

Llegado ese punto máximo de cobertura de *Brachypodium*, la situación vira hacia un progresivo incremento de arbustos que sucede al descenso de esparto, que prosigue a lo largo de todo el tramo.

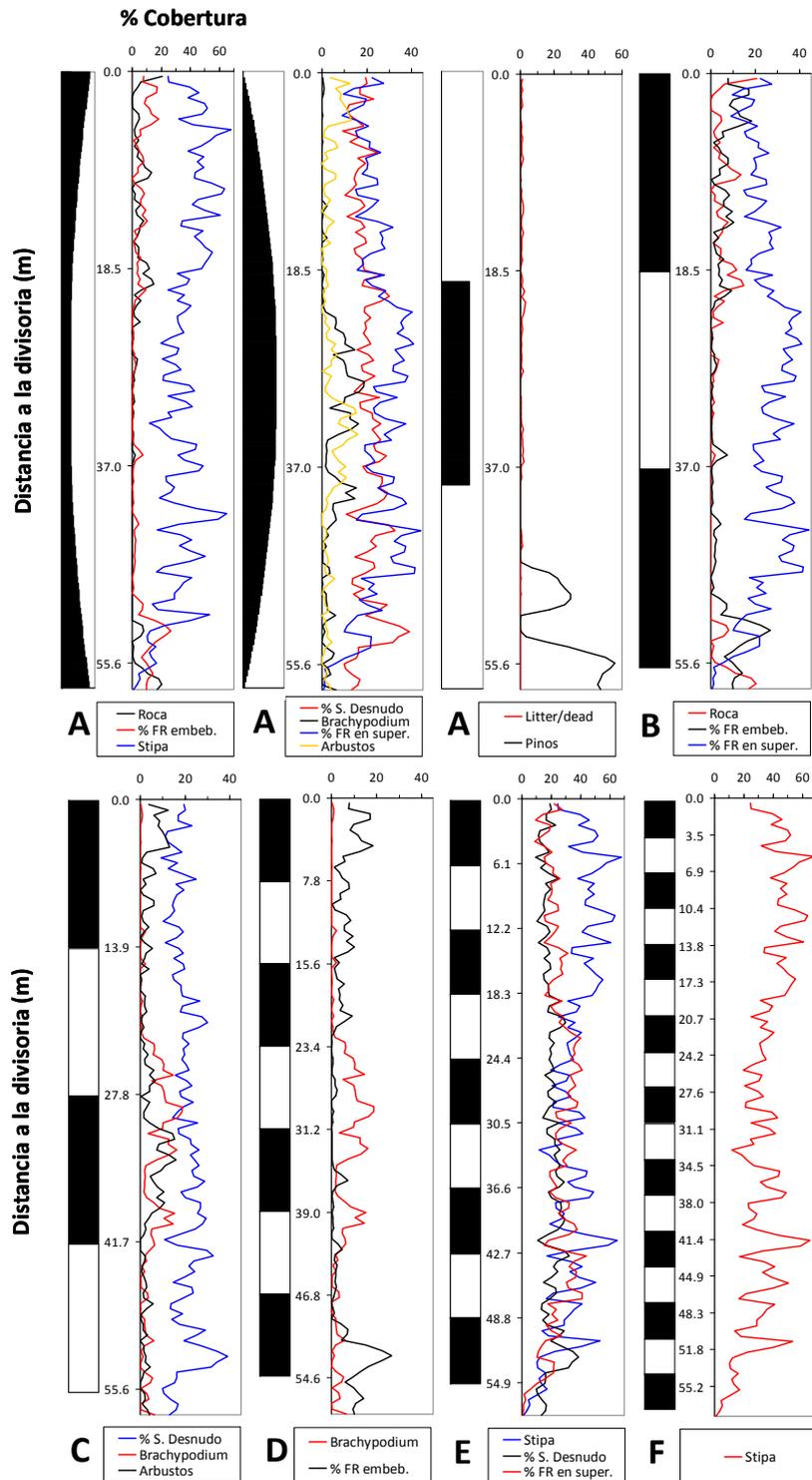


Figura 4.15 Curvas de porcentaje de cobertura a lo largo de la ladera de BES por niveles de periodicidad que muestran la ocurrencia y asociación de CSS en cada uno de ellos. Las marcas de graduación del eje correspondiente a la posición en el transecto se establecen por el valor de periodicidad de cada nivel. Las escalas laterales sirven de elemento de referencia y las bandas grises delimitan aproximadamente la correspondencia de cada ciclo en la realidad terreno.

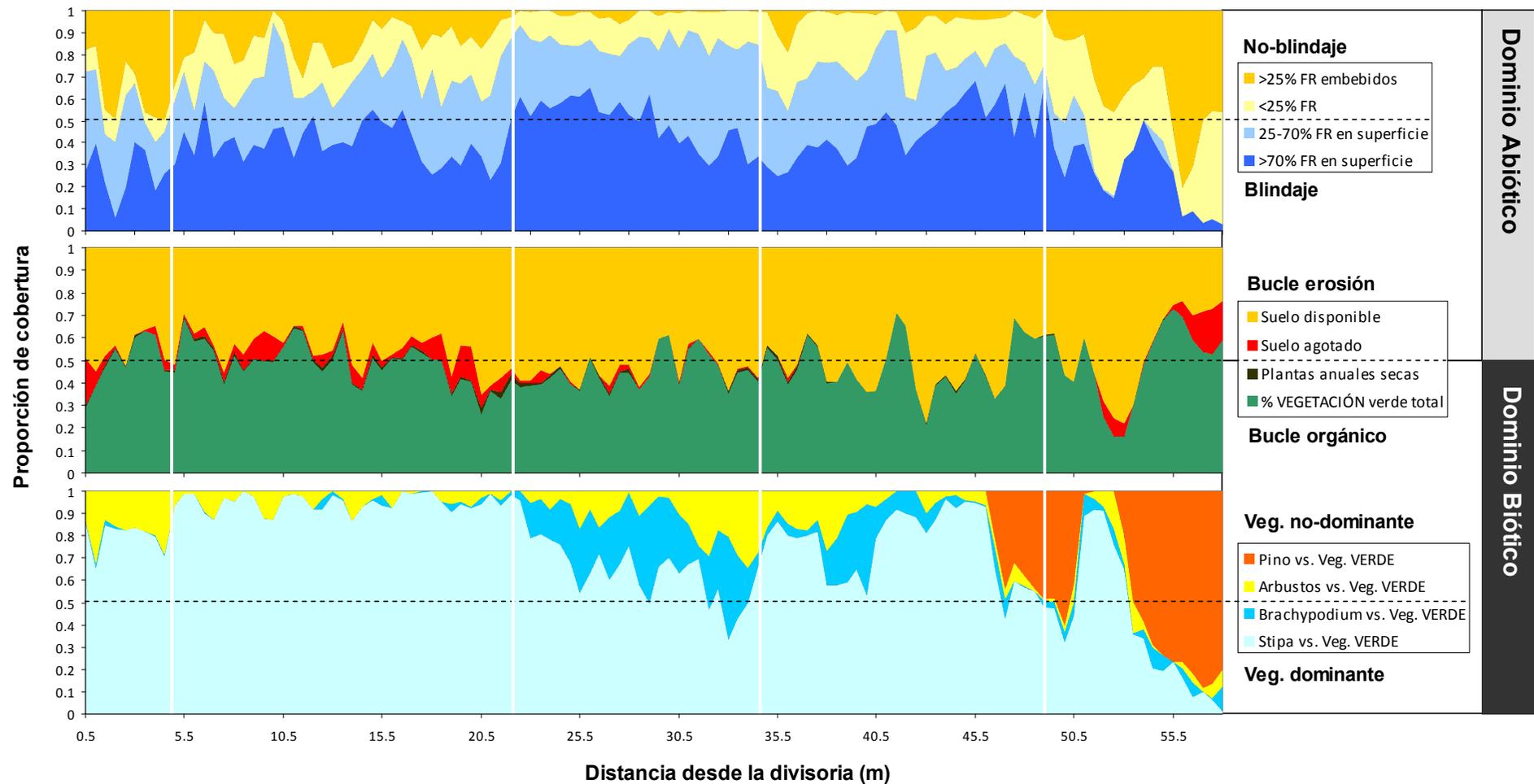


Figura 4.16 Distribución de porcentajes de cobertura de los CSS presentados en grupos funcionales según su correspondencia con los diferentes su pertenencia al dominio biótico o abiótico para la ladera de BES. El gráfico central aglutina a todas las categorías de CSS, mientras que los de los extremos desglosan la composición de las fracciones de suelo con pedregosidad (arriba) y de vegetación verde (abajo).

En este subtramo la cobertura relativa de 70FRsup respecto de 50FRsup comienza a decrecer, resultando en unos espacios interparche con una menor pedregosidad superficial. Esto se explica por la diferente fisionomía de los arbustos, con una mucha menor eficiencia en el efecto barrera frente al tránsito de sedimentos en comparación con las otras herbáceas, y por tanto permitiendo una migración más efectiva de FR ladera abajo. Una cuestión relevante es el motivo por el cual los arbustos comienzan su proliferación llegado un determinado umbral de maximización de la cobertura de *Brachypodium*. Se hipotetiza que los arbustos ocupan unos microambientes con peores condiciones de humedad y profundidad de suelo que el *Brachypodium*, incluso a veces que el esparto (usurpación). Se alcanza un umbral máximo de cobertura de arbustos en detrimento del *Brachypodium*, pero comienza una progresiva recuperación del esparto, con unos mínimos también en la proporción de 70FRsup. La abundancia de arbustos permite una mayor migración de FR aguas abajo por su reducido efecto barrera, y por tanto va disminuyendo el blindaje superficial y aumentando la erosión. Podría hablarse de un comienzo del declive de la zona de amortiguación y acumulación, bajo control del transporte, reactivándose a partir de aquí la movilización de sedimento por el incremento de la conectividad (cuestión que se analizará en el apartado 5.3). Aquí termina este subtramo de acumulación de sedimentos proveniente de la onda de movilización del suelo del sector aguas arriba (dinámica hidro-geomorfológica).

Comienza el **siguiente subtramo, Sector IV (35-49 m)**, Figura 4.16), a lo largo del cual se vuelve a recuperar gradualmente la proporción de 70FRsup en detrimento de las 50FRsup y donde se registran los valores máximos de proporción de 25FRsup y vuelven a aparecer los FR embebidos. Es la zona donde menor presencia de afloramientos rocosos se registra. Esto nos informa de un progresivo reestablecimiento de la dinámica secuencial de *arranque-transporte-sedimentación* en los espacios interparche ya detectada en el sector II, propiciando la mayor presencia de esparto (incrementándose el tamaño de grano en su patrón espacial) que conlleva unas mayores distancias entre plantas, y por tanto la oportunidad de esta diferenciación de subambientes relacionados con la movilización de sedimento. Sin embargo, en la parte central del área de estudio en esta vertiente todavía se observa un subtramo con abundancia de *Brachypodium*, que apunta a una dinámica todavía característica del sector III precedente. Esta secuencia mixta de patrones de distribución apunta a que estamos en un tramo transicional, donde se está produciendo un nuevo reajuste eco-hidro-geomórfico, pero todavía manteniendo propiedades del estadio anterior (sector III). El hecho de la escasa presencia de afloramientos de roca a lo largo de este sector evidencia que no se produce agotamiento del perfil de suelo como resultado de la dinámica de exportación de sedimento, lo cual lo relacionamos con un balance entre entradas y salidas de sedimento equilibrado. Al final del tramo, cuando el esparto ya se ha restaurado como especie dominante con la presencia escasa de arbustos y *Brachypodium*, aparece vegetación arbórea (pinos) que alcanza casi el 50% de la superficie vegetada.

El siguiente y último tramo, **Sector V (49-58 m)**, supone un cambio drástico en la dinámica hidro-geomorfológica que lo rige, siendo éste la franja basal de la ladera. Este tramo es de forma convexa en perfil, con el correspondiente incremento de la pendiente, indicando esta circunstancia la zapa basal, aunque no actual por la presencia de terrazas de cultivos en el fondo de valle, por lo que esta convexidad también puede estar relacionada con la degradación de los suelos por actividad humana. Es característico que este tramo el progresivo aumento de afloramientos rocosos y de las superficies con FR embebidos a medida que llegamos al final del transecto, al tiempo que las superficies con

abundante FR en superficie decrecen sustancialmente hasta la práctica desaparición; signos de intensa evacuación de material en este sector. Como propagación de la masa arbórea que está presente en los rellenos de fondo de valle, se produce la colonización de pinos, viéndose incrementada la cobertura global de vegetación de un modo en parte artificioso, pues el sustrato arbóreo no ejerce un efecto barrera de sedimentos ni la misma dinámica respecto de la escorrentía que el resto de vegetación. En el segmento libre de pinos, se observa una acusada recesión de la cobertura de vegetación, no llegando ni al 20% en su pico mínimo, y de nuevo con una completa dominancia del esparto, pudiéndose tomar como situación de referencia en torno a la cual se mueven las coberturas del resto de vegetación bajo la copa de los pinos.

4.2.4.2. Caso de Benidorm Norte (BEN): umbría en el semi-árido.

Esta ladera (BEN), en contraste con su opuesta (BES), muestra notables diferencias en la descomposición de las señales de cobertura de CSS. Si bien en global son múltiples las periodicidades encontradas, a diferencia de en BES, la co-periodicidad múltiple entre CSS en un mismo periodo es mucho más limitada (Tabla 4.4 y Figura 4.17), lo que ya apunta a una menor interdependencia entre CSS. Esta asociación limitada, se produce de forma más frecuente y con más número de CSS hacia los niveles inferiores de escala, mientras que BES muestra una frecuente co-periodicidad entre diversos CSS en todos los niveles, con una leve disminución hacia los niveles inferiores (ver Tabla 4.4).

En el nivel más general que abarca la ladera completa (1/1, Figura 4.17-A) tan sólo se detectan tres CSS, el suelo desnudo con un modelo de distribución convexo con el consiguiente detrimento de cobertura vegetal en la parte central de la ladera, su antagónico cóncavo representado por el *Brachypodium*, y finalmente los pinos con una distribución concentrada, que en este caso se extiende sobre la mitad inferior del transecto. Esta concentración en la distribución se debe a que los pinos en esta ladera son de reciente colonización tras el proceso de abandono de las terrazas de cultivo, y como propagación de la masa arbórea presente en los bancales del fondo de valle. El resto de CSS no parecen presentar una distribución característica a nivel de periodicidad de ladera completa.

En el segundo nivel, compartimentando la ladera en dos sectores (1/2, Figura 4.17-B) encontramos a los FR en superficie, donde se observa una primera zona con valores más moderados y más estables frente a un valor promedio de un 20%, seguido de la otra mitad del transecto donde la amplitud de variación es mucho más acusada, con valores que fluctúan desde casi el 50% hasta incluso menos que 5%. Esta distribución dual se explica por el historial de usos de esta ladera que presentaba terrazas de cultivo, cuyos muros se situaban a partir de la parte media del transecto y actualmente están derruidos.

El tercer nivel (1/3, Figura 4.17-C) encuentra asociación entre esparto y arbustos, en una secuencia de ciclos donde se observa una alternancia de relativo incremento y escasez de ambos.

En el cuarto nivel (1/4, Figura 4.17-D), la co-ocurrencia en esta resolución se produce entre el *Brachypodium* y los FR en superficie, compartimentándose el transecto en sectores donde ambos componentes se alternan en relativa abundancia, denotando cierto grado de antagonismo, pero a la

vez manteniendo cierta asociación en la magnitudes alcanzadas en cada subsector. Esto es, subtramos en los que existe de manera generalizada cierta escasez de uno de los componentes, también se registra en el otro, y *viceversa*, pero intrincados dentro de cada subtramo de manera antagónica.

El siguiente nivel, el quinto (1/5, Figura 4.17-E) asocia el suelo desnudo con FR embebidos, en una cadencia de subtramos donde se registran ciclos de fluctuación de cada CSS, si bien la cobertura de FR embebidos es muy baja. Aparecen, puede estar informando de cierta asociación entre ambos pero con demora.

El sexto nivel (1/6, Figura 4.17-F) recoge la asociación espacial entre pinos y esparto, manifestando un fuerte antagonismo entre ambas. Los pinos sólo están presentes en la mitad inferior del transecto, resultado de la onda expansiva ladera arriba de la colonización de pinos de los bancales. Relacionado con esto último, es destacable el hecho de que, a modo de excepción, este antagonismo no se observe en el pico de cobertura de pinos más ladera arriba, que se asume el de más reciente colonización. Lo cual puede estar asociado a que existe alguna relación de competencia por el espacio entre ambas especies, en una fase temprana de colonización del pino, que todavía dificulta que se plasme este efecto en la distribución de coberturas. Observando lo que ocurre a este respecto en la ladera BES, los resultados son compatibles con esta interpretación.

Ya en el penúltimo nivel (1/10, Figura 4.17-G) vuelven a encontrarse asociados el *Brachypodium* y los FR en superficie (también en el nivel 1/4), siendo característico de este nivel la demora registrada por los FR en superficie respecto de los picos de abundancia de *Brachypodium*. Este hecho informa de una secuencia espacial ladera abajo de presencia de *Brachypodium* seguido de un incremento en la cobertura de FR, y sin embargo mayor ausencia de éstos cuando el *Brachypodium* es más abundante, esto es, cierto antagonismo *in situ*, pero con una correlación espacial aguas abajo.

Finalmente a la más baja resolución analizada (1/11, Figura 4.17-H), aunque de extensión muy próxima a la anterior (3.9 y 3.6 de periodicidad respectivamente, Tabla 4.3), se asocian esparto y hojarasca en términos de co-existencia, significando que la hojarasca tiene su origen en la materia seca del esparto. Resulta relevante que en la ladera BES la presencia de hojarasca no fuese suficiente para ser incluida como clase de la cartografía, pudiendo ser interpretada en dos sentidos, bien que los procesos de descomposición y remoción son más efectivos en la ladera BES reduciendo a un mínimo la acumulación de hojarasca, bien la mayor actividad vegetativa en la ladera BEN. Además se identifica de nuevo la co-periodicidad entre esparto y arbustos (ya detectada en el nivel 1/3), que en esta resolución muestra una fluctuación armónica pero con cierta demora de los arbustos respecto del esparto, denotando asociación de especies en algún sentido. Se destaca aquí que no se ha encontrado co-periodicidad en ningún nivel del *Brachypodium* con cualquier otra tipología de vegetación, infiriéndose cierta independencia del resto de componentes bióticos, estando más determinada su abundancia por factores abióticos.

Una vez identificado y descrito la periodicidad de los CSS a lo largo del transecto con sus respectivas interrelaciones con otros CSS en los diferentes niveles de resolución o periodos, se completa la interpretación en clave de procesos a partir de la información que proporciona la distribución de los

diferentes grupos funcionales asociados a los mecanismos de blindaje superficial (Figura 4.18). Se identifican cuatro sectores según la distribución de componentes en la fracción biótica y abiótica.

El **Sector I (0-15 m, Figura 4.18)**, constituye todo el primer tramo desde la divisoria hasta casi la parte central del transecto, donde a partir del cual se produce un abrupto incremento de las superficies de 70FRsup. Este umbral se atribuye a la acumulación de piedras, que por su tamaño parecen provenientes del derrumbe de antiguas terrazas de cultivo, y que en este primer tramo no parece tener su influencia directa. De hecho este sector se caracteriza por una dominancia de superficies de cobertura moderada de FR (50FRsup), si bien con presencia de algunos picos de incremento de la pedregosidad (70FRsup). Esta diferenciación de ambientes de pedregosidad contrastada coincide con la presencia de esparto, que domina de forma alterna en este tramo.

Precisamente cuando la proporción de esparto decae, se producen los incrementos en la pedregosidad, en un caso con la preponderancia de arbustos (en torno al metro 6) y en otro de *Brachypodium* (en torno al metro 13). En la cartografía (Figura 4.2), se observa cómo estas superficies más pedregosas se sitúan siempre en el contexto de un tamaño de grano del patrón de suelo no-vegetado más fino, el cual lo proporcionan los espacios con predominio de arbustos y *Brachypodium*, frente al patrón de grano más grueso, con más espaciado, en presencia de esparto.

La otra zona de localización preferente de los espacios más pedregosos es inmediatamente ladera abajo de los parches de vegetación (Figura 4.2), contrariamente a lo que ocurría en BES.

Ya en el **Sector II (15-25 m, Figura 4.18)**, se observa una casi completa homogeneización de los CSS abióticos hacia superficies muy pedregosas (70FRsup) en toda su extensión (Figura 4.2). Esta cierta anomalía, que lleva asociada un aporte extra de FR en superficie, se explica por el aporte y redistribución de los FR de las paredes ya derruidas de las terrazas de cultivo que existían en esta ladera. Además este tramo se caracteriza por la progresiva desaparición del esparto, con el respectivo avance del *Brachypodium* y la entrada de pinos, que llegan a dominar en el final de este subtramo. A este sector se le asocia unas mejores condiciones edáficas respecto del resto de la ladera, puesto que el *Brachypodium* llega a desplazar al esparto, siendo una especie que requiere mejores condiciones microambientales. Estas condiciones más favorables son un buen espesor de suelo herencia de las antiguas terrazas, así como unas condiciones de mantenimiento de la humedad del suelo mejoradas por una mayor cobertura de FR que protegen de la evaporación.

En el siguiente **Sector III (25-35 m, Figura 4.18)** pese a mantenerse en la fracción abiótica un predominio de superficies muy pedregosas (70FRsup) aparecen también superficies en el intervalo intermedio (50FRsup) y algunas de menor pedregosidad (25FRsup). Además reaparece el predominio del esparto minimizando la presencia de *Brachypodium*. La cobertura general de vegetación en este subtramo va incrementándose paulatinamente, hasta alcanzar un máximo (en torno al 90%) por la presencia de pinos.

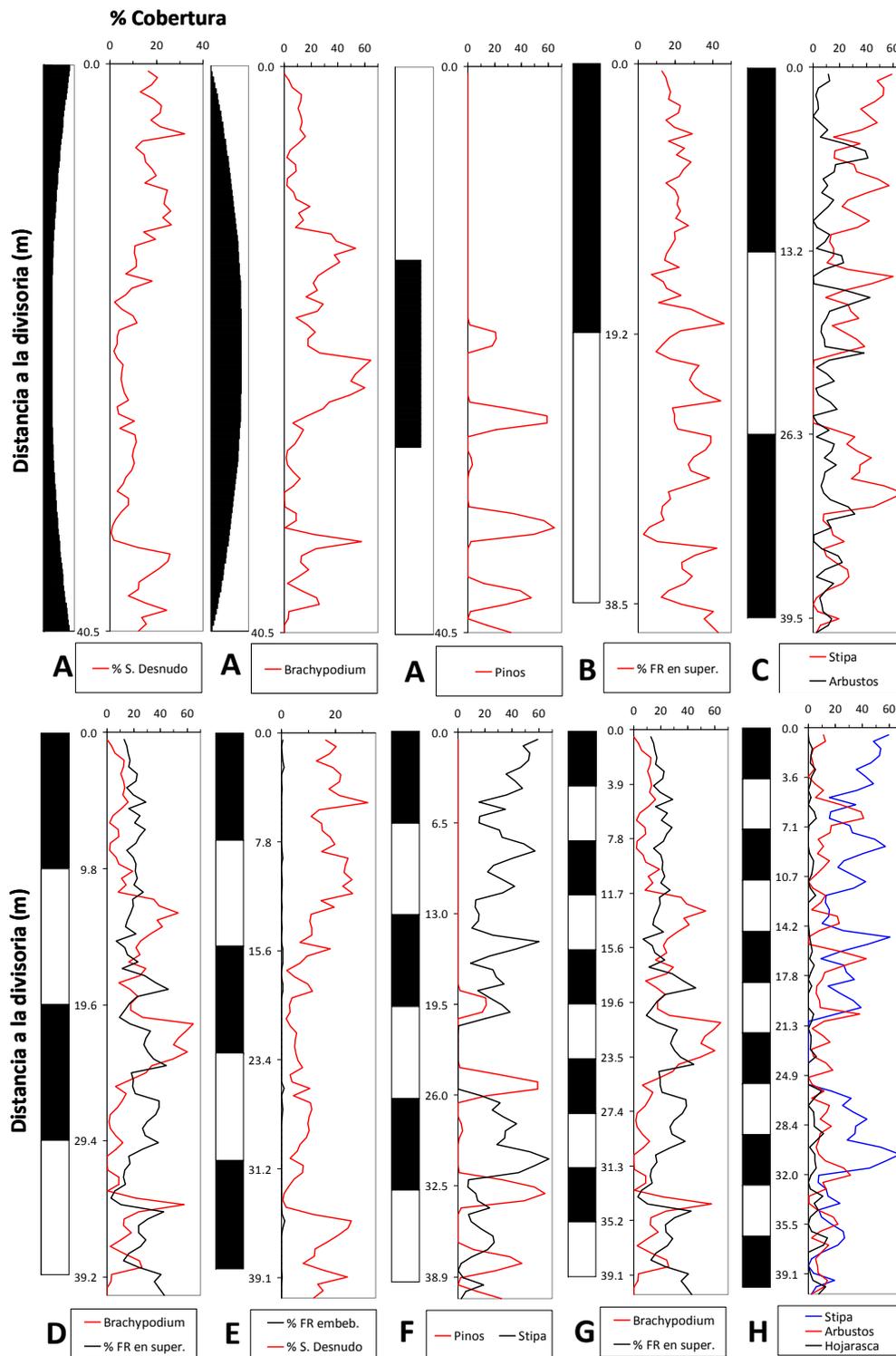


Figura 4.17 Curvas de porcentaje de cobertura a lo largo de la ladera de BEN por niveles de periodicidad que muestran la ocurrencia y asociación de CSS en cada uno de ellos. Las marcas de graduación del eje correspondiente a la posición en el transecto se establecen por el valor de periodicidad de cada nivel. Las escalas laterales sirven de elemento de referencia y las bandas grises delimitan aproximadamente la correspondencia de cada ciclo en la realidad terreno.

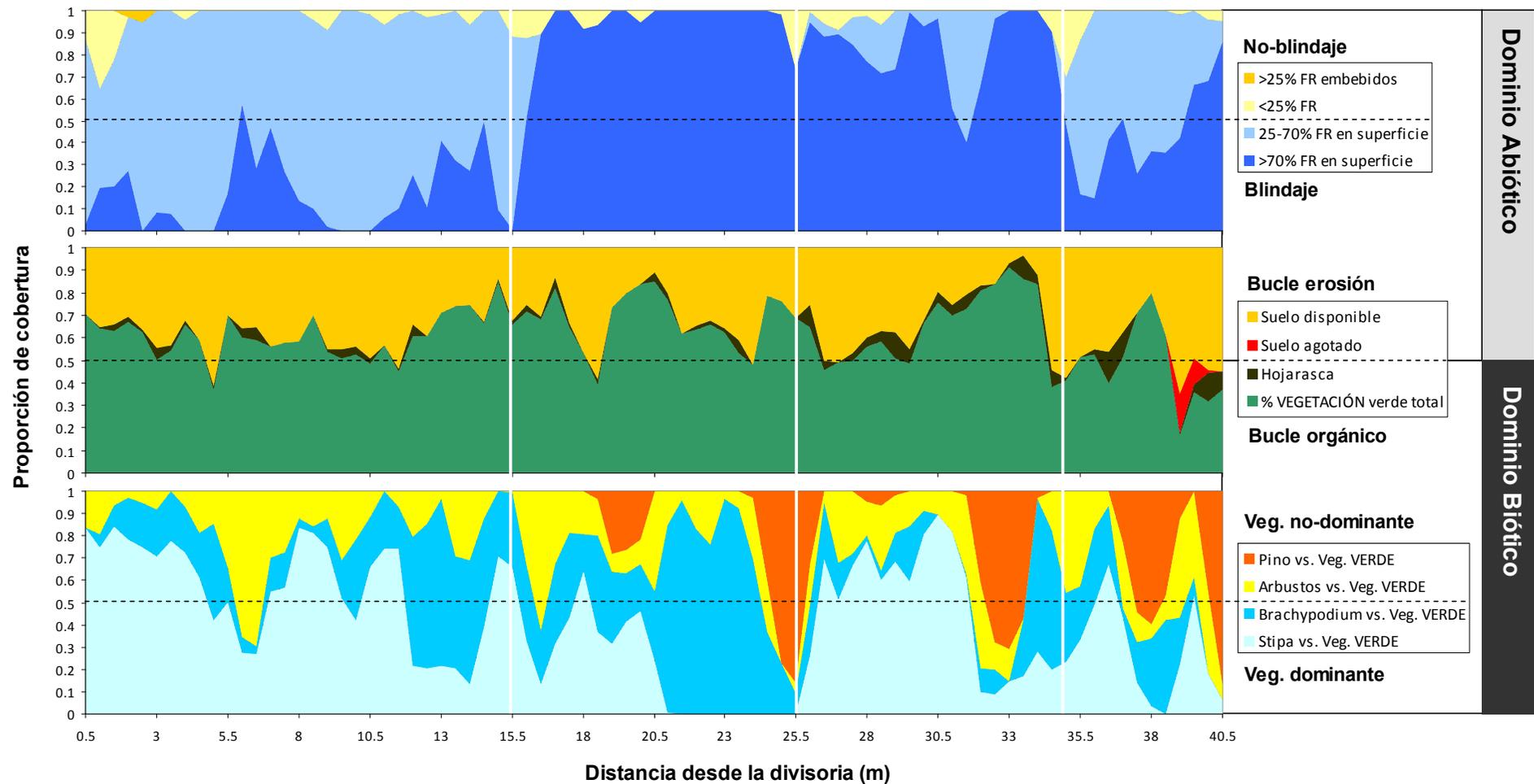


Figura 4.18 Distribución de porcentajes de cobertura de los CSS presentados en grupos funcionales según su correspondencia con los diferentes su pertenencia al dominio biótico o abiótico para la ladera de BEN. El gráfico central aglutina a todas las categorías de CSS, mientras que los de los extremos desglosan la composición de las fracciones de suelo con pedregosidad (arriba) y de vegetación verde (abajo).

En términos generales, la proporción de cobertura de FR es asimismo muy elevada con un descenso en el seno del subtramo, asociado éste al entorno de los individuos de esparto, que presenta tamaños de grano interparche mayores, donde las longitudes de flujo potencial se incrementan (Figura 4.2). Así, si bien este sector se asume igualmente afectado por la presencia extra de FR provenientes de los antiguos muros de las antiguas terrazas, este efecto se muestra atenuado por su contigüidad con la parte baja de la ladera, donde ya se produce la evacuación de sedimentos fuera del sistema ladera. La dominancia de esparto nos informa además de que este tramo ya no presenta las mismas mejoras de las condiciones edáficas necesarias para el *Brachypodium*.

Este tramo, al igual que el anterior, contiene al final un ejemplar de pino, que aunque no tiene un efecto barrera muy importante sí reduce la energía de la precipitación disminuyendo la capacidad erosiva de la misma. Además favorece el efecto de isla de fertilidad al extenderse alrededor del mismo una corona densa de *Brachypodium*, la cual sí ejerce de barrera de sedimentos y FR eficiente frenando la onda de progresión de los mismos ladera abajo.

El último, **Sector IV (35-41 m, Figura 4.18)** corresponde con el pie de la ladera, que al igual que en la ladera BES es convexa con cierto incremento de la pendiente. Este tramo es el único donde aparece algún afloramiento rocoso, que a pesar de ser de muy escasa entidad, ya es un indicio de las elevadas tasas de remoción de suelo. Otro indicio de la progresiva degradación del suelo es la disminución de la vegetación en este tramo, a pesar incluso de la presencia de pinos y del esparto. Esta última aparece amalgamada con parches de herbáceas y arbustos, reteniendo FR y ocasionando superficies de pedregosidad elevada (70FRsup, ver Figura 4.2).

En el resto de superficie no-vegetada, donde se ha producido un aumento del tamaño de grano, la componente superficial característica vuelve a ser la de pedregosidad media (50FRsup), denotando un reestablecimiento de la situación de partida que encontrábamos en el Sector I, ya fuera de la influencia de la acumulación de FR del derrumbe de las terrazas, en este caso por la asumida evacuación de estos ya fuera del sistema ladera. Si bien todavía persiste en la parte inferior izquierda (Figura 4.2) una zona de acumulación de FR que por cuestiones micro-topográficas no han debido ser todavía evacuadas, en contraste con la parte inferior derecha, donde aflora la roca madre, como indicio de mayor remoción.

4.2.4.3. Caso de Cocoll Sur (CCS): extremo sub-húmedo del gradiente climático

En el área de CCS, en términos generales, llama la atención que en las co-periodicidades encontradas en los diferentes niveles de resolución se observa un patrón recurrente en relación a las clases de CSS asociados (Tabla 4.4 y Figura 4.19). La asociación más frecuente y repetida es entre suelo desnudo y arbustos, de signo antagónico la mayoría de las veces, que se manifiesta hasta en cuatro periodos a lo largo de todo el rango (periodos 1/3, 1/6, 1/11, 1/15), y que en dos de ellas comparten asociación también con las herbáceas, en co-existencia esta vez con los arbustos. La siguiente es la asociación de FR en superficie, esta vez con arbustos y herbáceas simultáneamente, también en relación antagónica, en dos periodicidades. El resto ya son CSS en los que se detecta periodicidad individual, sin asociación, que corresponden con la materia seca (aliaga muerta) y roca desnuda.

El primer nivel (1/1, Figura 4.19-A), que informa sobre la distribución general a lo largo del transecto, muestra el antagonismo entre los FR en superficie, que muestra un modelo *convexo* de incremento en la parte central, y los dos tipos de plantas, herbáceas y arbustos, que en contraposición presentan un modelo *cóncavo* con una mayor cobertura en los extremos de transecto.

El segundo nivel (1/3, Figura 4.19-B) asocia ya el suelo desnudo y los arbustos, en este caso delimitando tres sectores en los que se dan fluctuaciones en los valores de cobertura en algún grado semejantes. Teniendo así un primer sector en el que la oscilación es más amplia que en el resto. Le sigue una parte intermedia donde el patrón de oscilación es más constante, y menos amplio. Acaba con una zona baja caracterizada por la mayor amplitud registrada en todo el transecto en ambos CSS, registrando así cambios significativos de cobertura en poco espacio, lo que denota un patrón espacial global más contrastado. Estas diferencias tienen una traducción directa en términos de tamaño de grano del patrón, siendo en orden descendente el más grueso, el más fino y el de tamaño intermedio. La asociación entre estos dos CSS evidencia una correlación de co-periodicidad entre ambos.

El siguiente nivel detectado (1/5, Figura 4.19-C) corresponde con la aparición de aliagas muertas con una cadencia de aproximadamente 20 m, aunque en proporción variable, aunque el hecho más significativo es que no aparezca asociada a ningún otro CSS. Esto indica que sea probablemente un fenómeno de senectud asociado al ciclo de vida de la especie y no a su posición relativa a otros CSS.

Descendiendo de nivel (1/6, 17 m aprox., Figura 4.19-D) se encuentra el mayor número de asociaciones de CSS, FR en superficie, suelo desnudo, arbustos y herbáceas, los cuales corresponden a los CSS más representados del dominio abiótico y biótico. Lo que se extrae de la segmentación en este nivel son subtramos con cierta homogeneidad en la tendencia y amplitud de las fluctuaciones, a modo de *paquetes* con propiedades diferentes en los que interrelacionan los diferentes CSS. El CSS donde mejor se evidencia esta periodicidad es la clase arbustos, que puede tomarse como componente de referencia y del que parece que dependen el resto de componentes. En este sentido la trayectoria de los FR en superficie se muestra con un claro comportamiento antagónico a la de arbustos. El suelo desnudo se muestra sin embargo en consonancia con el signo de variación de los FR, si bien no en magnitud, la cual como ya se ha indicado anteriormente depende del comportamiento de los arbustos (nivel 1/3). La presencia de herbáceas parece se relaciona con la magnitud de cobertura de los arbustos, aunque su trayectoria presenta cierta demora, esto es, que en sectores con mayor cobertura de arbustos es donde más proporción de herbáceas encontramos, si bien no con una co-correspondencia espacial simultánea.

El nivel inferior (1/7, 14 m aprox., Figura 4.19-E) está representado únicamente por los afloramientos de roca madre, si bien este caso de periodicidad en el patrón puede tomarse como paradigmático en el sentido de intensidad de la señal, como muestra el pico máximo de frecuencia detectado en su periodograma (Figura 4.12c). Este fuerte carácter cíclico unido al hecho que no se encuentra asociado a ningún otro CSS; puede estar relacionado con la alternancia de los estratos de las calizas. Así pues, en la actualidad es un componente no sujeto a los procesos actuales, si bien la pérdida de esta periodicidad podría significar una tendencia de pérdida muy importante de suelo.

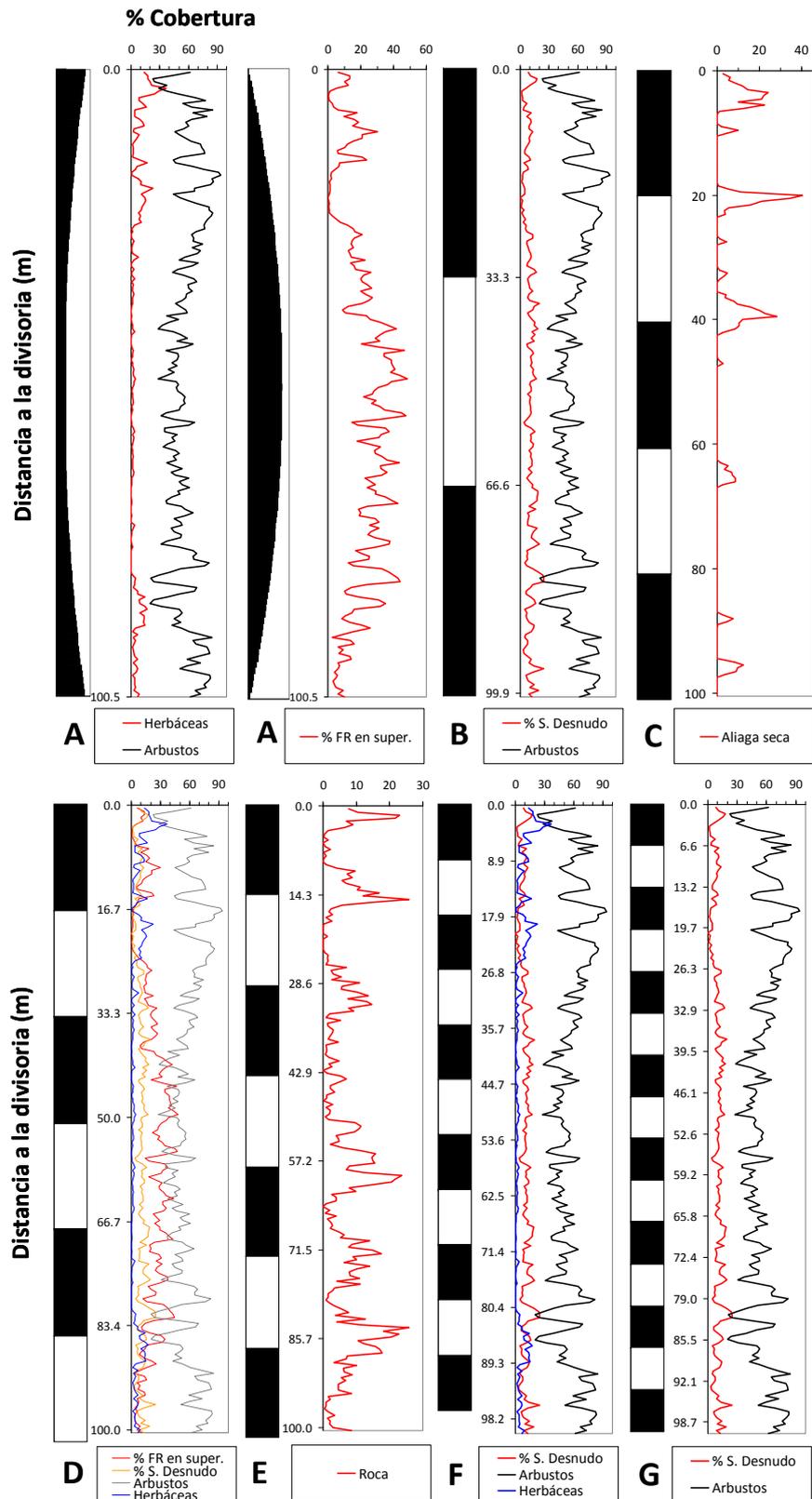


Figura 4.19 Curvas de porcentaje de cobertura a lo largo de la ladera de CCS por niveles de periodicidad que muestran la ocurrencia y asociación de CSS en cada uno de ellos. Las marcas de graduación del eje correspondiente a la posición en el transecto se establecen por el valor de periodicidad de cada nivel. Las escalas laterales sirven de elemento de referencia y las bandas grises delimitan aproximadamente la correspondencia de cada ciclo en la realidad terreno.

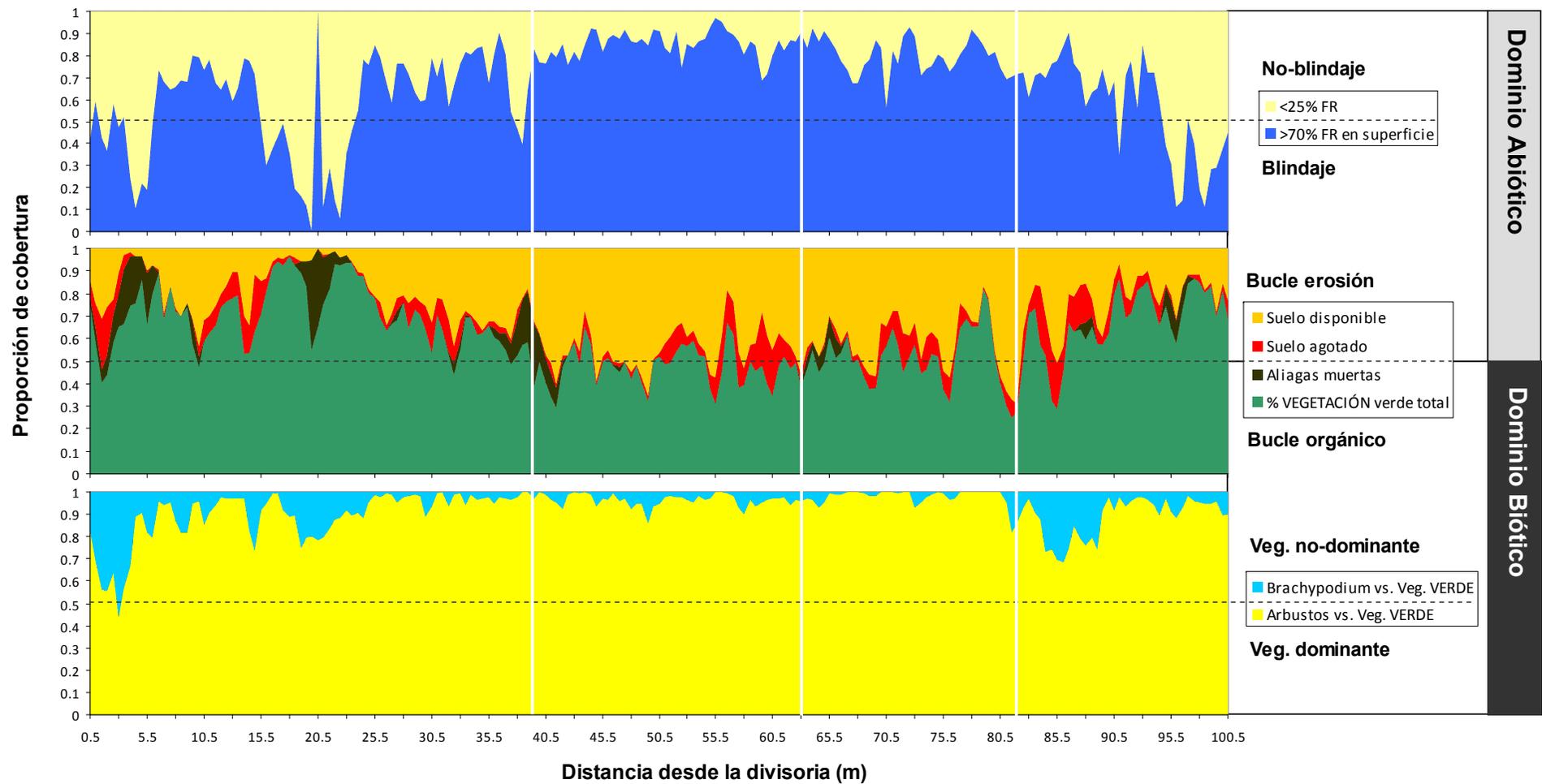


Figura 4.20 Distribución de porcentajes de cobertura de los CSS presentados en grupos funcionales según su correspondencia con los diferentes su pertenencia al dominio biótico o abiótico para la ladera de CCS. El gráfico central aglutina a todas las categorías de CSS, mientras que los de los extremos desglosan la composición de las fracciones de suelo con pedregosidad (arriba) y de vegetación verde (abajo).

En el penúltimo nivel (1/11, Figura 4.19-F) vuelve a aparecer la asociación suelo desnudo, arbustos y herbáceas, esta vez sin FR en superficie. Aquí los ciclos parecen corresponder fundamentalmente con tramos de relativo aumento mantenido de la señal tras un descenso significativo de arbustos. Suelo desnudo y herbáceas presentan un comportamiento en este nivel antagónico a la cobertura de arbustos, aumentando uno u otro en momentos de disminución de los últimos, de forma que ambos se asocian también en *competencia* por el espacio. Las herbáceas ganan protagonismo en los subtramos de la ladera donde la cobertura de arbustos es relativamente elevada (extremos superior e inferior del transecto). Sin embargo el suelo desnudo cobra especial relevancia en el caso opuesto, donde la cobertura general de arbustos es relativamente inferior (tramo central del transecto). Esto se resume en una asociación antagónica entre arbustos con suelo desnudo y herbáceas pero condicionada al estado de degradación del microambiente, si asociamos mayor cobertura general de arbustos a un mayor espesor de suelo.

El último nivel (1/15, 6.6 m, Figura 4.19-G) presenta de nuevo la recurrente asociación de arbustos y suelo desnudo, pero en este caso a mayor resolución. De nuevo los arbustos son el componente con más intensidad de la señal en este periodo, quedando el suelo desnudo en una posición de respuesta variable. En este nivel es donde mejor se aprecia la co-periodicidad en términos de antagonismo. Precisamente el hecho que ambos mantengan su asociación hasta el nivel más fino en resolución denota una intensa relación entre ambos, interpretada aquí como de dependencia del suelo desnudo a los espacios de declive de los arbustos, que son la vegetación dominante. Destacar aquí que ni siquiera los FR en superficie, los cuales presentaban una relación más evidente de antagonismo con los arbustos en niveles de escala superiores (nivel 1/6) mantienen a este nivel más bajo su co-periodicidad. Por tanto se concluye que el grado de exposición del suelo desnudo, y por tanto de vulnerabilidad del suelo en términos generales, es directamente proporcional al declive de la cobertura de vegetación.

En el caso de la ladera de CCS, donde no existe las tipologías de RF embebidos, ni intervalos de cobertura intermedia (50FRsup), la incorporación en el análisis de la dimensión de los ciclos de retroalimentación en función del blindaje superficial aporta menos elementos de reinterpretación que en los casos de estudio del área de Benidorm, donde se registra una mayor complejidad en la composición de la fracción abiótica. Sin embargo, sí nos sirve de elemento aglutinador que permite la zonificación de la ladera en subtramos característicos y su respectiva interpretación en términos de procesos.

Se ha segmentado la ladera en cuatro grandes subsectores (Figura 4.20), en número más reducido que en los casos de Benidorm, a pesar de ser la ladera de mayor longitud, lo que denota una relativa simplicidad en los patrones de distribución espacial. Básicamente la ladera consta de dos sectores extremos, parte alta y baja del transecto, que aunque con matices, mantienen todavía una buena cobertura vegetal en torno al 70%, y de la parte central más degradada donde la vegetación cubre el 40%. En términos globales la fracción abiótica se constituye, además de por una distribución periódica de afloramientos de roca madre, por un predominio de las superficies blindadas por pedregosidad elevada (70FRsup) con fluctuaciones variables en el otro extremo de cobertura de FR (25FRsup).

El **Sector I (0-40 m, Figura 4.20)** se caracteriza por una alternancia de bandas donde se mantiene un patrón de vegetación más denso, con coberturas que incluso superan el 90%, con otras donde ésta desciende a cotas de hasta el 50%. Las áreas donde se produce un declive de la vegetación coinciden con las de un incremento significativo de la proporción de herbáceas en detrimento de los arbustos. También se detecta la fase previa a la apertura de claros de vegetación verde con la presencia de individuos muertos de aliaga (la especie dominante de los arbustos), cuya distribución refuerza un patrón espacial de la vegetación a modo de *diente de sierra*, con oscilaciones de incremento y descenso significativo. Es precisamente en esas zonas donde se registra en la fracción abiótica una drástica reducción de la proporción de la pedregosidad superficial, quedando así el suelo desnudo prácticamente expuesto. La interpretación en clave de procesos es que estos parches de suelo prácticamente desnudo (25FRsup) constituyen las áreas de más reciente retroceso de la masa vegetal, pasando previamente por las fases de senectud, muerte y descomposición de individuos de aliagas. En este suelo desnudo de nueva incorporación en el ciclo abiótico, comienza entonces la dinámica del ciclo de retroalimentación de blindaje superficial, que con el tiempo, por la progresiva remoción de sedimentos por escorrentía, estas superficies van incrementando su cobertura de FR. Las herbáceas encuentran en estos parches unas condiciones óptimas de colonización por la disponibilidad y calidad de este suelo. En conjunto es la parte de la ladera con suelos más potentes que llegan a alcanzar los 40 cm de profundidad.

Ya en el **Sector II (40-63 m, Figura 4.20)** se produce un considerable retroceso en dominio biótico con el consiguiente cambio en la estructura del patrón de vegetación/no-vegetación, pasando a tener un menor tamaño de parches vegetados ya individualizados hasta el punto de quedar espacialmente insertos en una *matriz* inter-parche interconectada (Figura 4.2). Esta configuración del patrón simplificado a dos únicas clases (biótico-abiótico) se aproxima al característico de ambiente semiárido, en forma de mosaico fuente-sumidero, tal y como se evidencia en la zona de Benidorm, fundamentalmente en la ladera BES. Otra característica relevante es el absoluto dominio de los arbustos en la fase biótica, relegando a las herbáceas a una mínima presencia, no superando en sus máximos el 15% de cobertura. Respecto de la fracción abiótica, las superficies muy pedregosas dominan claramente todo el subtramo, fluctuando en torno al 80% pero con cierta estabilidad respecto del valor promedio. Esto, en el escenario binario que nos encontramos de superficies muy pedregosas *versus* desprotegidas, y siendo éste el sector con mayor grado de blindaje superficial se deduce que es el área más afectado por la pérdida de suelo.

El siguiente **Sector III (63-82 m, Figura 4.20)** destaca por ser una zona de transición de características mixtas entre la zona central más degradada y las más conservadas presentes en los extremos del transecto. Aquí la cobertura de vegetación se recupera moderada y paulatinamente a medida que se desciende en la ladera, hasta recuperar valores en torno al 70%, si bien siempre con las fluctuaciones en forma de dientes de sierra que caracterizan a esta ladera. La proporción de herbáceas en la fracción abiótica todavía mantiene los niveles muy bajos y estables del tramo de degradación (sector II). Sin embargo, la proporción de superficies poco pedregosas de la fase abiótica comienza a recuperarse de manera generalizada. Esto, como ya hemos señalado anteriormente, es un indicio del tiempo de exposición y por tanto del grado de evolución de las áreas que han sufrido un retroceso en su cubierta vegetal pre-existente..

Por último, el **Sector IV (82-100 m, Figura 4.20)** constituye el otro extremo de la ladera que todavía mantiene unas buenas condiciones de profundidad de suelo (Boix-Fayos, 2000) y cobertura vegetal en relación al resto de tramos más degradados. Se reproducen aquí las mismas características morfológicas que en su tramo homólogo de la parte alta de la ladera, ambos con suelos más profundos. En primer lugar, se recuperan los niveles de cobertura vegetal con unos picos máximos ya próximos al 90%, y con la presencia abundante de herbáceas en algún subtramo. Por otro lado, la distribución de superficies en la fase abiótica vuelve también a recuperar el patrón observado aguas arriba en el sector I, con franjas de fuerte retroceso de las superficies muy pedregosas (70FRsup) con el consiguiente avance del suelo casi desnudo (25FRsup), en las inmediaciones de la máxima cobertura vegetal, dónde comienzan a morir las aliagas como fase previa en el ciclo de degradación observado.

En síntesis, interpretamos que esta ladera se encuentra en una trayectoria de degradación condicionada por sus características topográficas y estructurales. Esta onda de degradación se manifiesta por una consecutiva y progresiva apertura de nuevos claros de vegetación, desde la parte central de la ladera, que funcionan como puntos de debilidad desde donde éstos se amplían de manera concéntrica.

4.3. SINTESIS Y CONCLUSIONES

En el objetivo de este capítulo de caracterizar los **patrones espaciales de distribución de los CSS** a escala de ladera y bajo diferentes condiciones climáticas (objetivo 1, Tabla 1.1.), tuvo una especial relevancia la **componente metodológica** desarrollada para su consecución, y que engloba todos los aspectos referidos a la obtención del foto-mosaico, la cartografía y el protocolo de análisis de la distribución de CSS. Los resultados obtenidos en la aplicación de esta propuesta metodológica en el análisis en nuestros casos de estudio situados en un gradiente climático y de degradación, permitieron poner de manifiesto el potencial de interpretación de esta aproximación.

Con respecto a la **obtención de la base cartográfica de CSS** (Figura 3.1.1) para su posterior análisis, destacó el resultado satisfactorio de la metodología empleada, tanto de adquisición y procesado de los fotogramas hasta alcanzar el foto-mosaico (resolución y geometría óptimas), como de fotointerpretación. Especialmente funcional resultó el proceso de sistematización de la lógica para el establecimiento de la **leyenda de CSS** (Figura 3.1.5), adaptable a cualquier entorno del ámbito semi-árido. La leyenda englobó la propia conceptualización del término *componente superficial del suelo* (CSS) incluyendo una síntesis de resultados de la bibliografía. Los trabajos dedicados a la comprensión de los procesos de generación de escorrentía a la escala de micro-parcela resultaron indispensables para el establecimiento de los intervalos representativos de porcentajes de cobertura de FR (Poesen *et al.*, 1990; Lavee y Poesen, 1991; Poesen y Ingelmo-Sanchez, 1992; Moustakas *et al.*, 1995)

Sin embargo, el principal logro metodológico fue la **sistematización de un análisis de patrones de distribución de CSS en clave de procesos eco-hidro-geomorfológicos** (Figura 3.1.8), basado en dos aspectos fundamentales: (i) adaptación de los conceptos de **heterogeneidad** (vs. homogeneidad) y

patrón (vs. aleatoriedad), referida a su manifestación espacial asociada a los procesos de flujo superficial, e (ii) interpretación de las formas **en clave de blindaje superficial** (Figura 3.1.11), que ejerce un **control abiótico** en la dinámica de los patrones de CSS y que no se le ha prestado desde su conceptualización (Thornes *et al.*, 1996; Kirkby, 2002) la suficiente atención (Ollesch y Vacca, 2002; Boix-Fayos *et al.*, 2006; 2007), focalizando el interés en el control biótico ejercido por la vegetación.

La cuestión de la cuantificación de la **heterogeneidad** se abordó mediante **índices de diversidad** en la composición, provenientes de la ecología.

Se realizó una redefinición del concepto de **configuración espacial** referido al análisis de patrones, distanciándonos de su acepción más extendida referida a la *forma geométrica de la ecología del paisaje* centrada en el desarrollo de índices de métrica espacial (p.e. FRAGSTATS, McGarigal *et al.*, 2012). Con el objeto de interpretación de procesos con una componente direccional (flujo superficial), aquí se trabajó la acepción del término referida a la *ordenación o estructura de la distribución*. El interés se focalizó en la secuencia de aparición de los CSS a lo largo de la ladera. Se adoptaron técnicas de **Análisis de Series Temporales (TSA)**, (Figura 3.1.9), para intentar identificar patrones espaciales (sustituyendo la variable temporal por la espacial), cuyos resultados conectaron directamente con las cuestiones de **jerarquía de niveles de escala** ajustadas a los objetivos y marco conceptual de análisis de los procesos en esta tesis.

La metodología se desarrolló paralelamente siempre a la **escala de ladera y de sitio** (cuando procede, quedando excluida por tanto la escala de sitio en el análisis de TSA). La escala de sitio fue un nivel óptimo de comparación entre subambientes de una manera global, mientras que la escala de ladera incorporó el valor de la distribución espacial interna, y con ello información interpretable en términos de procesos.

El reciente desarrollo de nuevas tecnologías de captación de imágenes de alta resolución, como son los DRONES o UAV, se presenta como una oportunidad de extender esta metodología de análisis a áreas más amplias.

Los resultados mostraron la existencia de una **anisotropía longitudinal** en el transecto frente a cierta **homogeneidad lateral** (Figura 4.8). La implicación más directa de este resultado fue que puede limitarse la anchura de muestreo a unos escasos metros sin verse afectada la representatividad del patrón. Esto posibilita una mayor eficiencia de muestreo en la toma de imágenes, aumentando las réplicas para analizar la variabilidad lateral en el *continuum* ladera, de cara a estudios futuros.

La **heterogeneidad** se evidenció en todos los casos y en ambas escalas de análisis, observándose a escala de **sitio** ciertos **gradientes** en el dominio de algunos CSS que pudieron deberse a condicionantes climáticos y/o de degradación. A escala de **ladera**, los índices de diversidad permitieron diferenciar patrones de distribución en sectores dentro de la misma ladera. (Figuras 4.9 y 4.10).

Analizada la heterogeneidad, el análisis del patrón mediante técnicas de TSA (Figura 4.12) detectó la presencia de diferentes patrones cíclicos de determinados CSS (asimilables a diferentes niveles de

resolución), además, en muchos casos, bajo unas condiciones de co-periodicidad (Tabla 4.4). Estos resultados, combinados con la interpretación proceso-patrón en clave de *blindaje superficial*, nos permitió la **sectorización** de cada transecto en la ladera (Figuras 4.16; 4.18 y 4.20) a partir de la detección de diferentes patrones de distribución de CSS. Estas diferentes configuraciones se tradujeron en tramos de ladera con microambientes con una variable **dinámica eco-hidro-geomorfológica**, y por tanto de redistribución de flujo de escorrentía y sedimentos (relaciones fuente-sumidero).

En un intento de conectar los resultados obtenidos en este capítulo con respecto al resto de apartados de la presente tesis, las cartografías de CSS sirven como entrada de *mapas base* para alimentar los escenarios de simulación de la escorrentía a escala de ladera que se realiza en el Capítulo 7) Además, también en el Capítulo 7, la *sectorización* aquí resultante sirvió para la interpretación de los resultados del modelo de simulación, en un intento de asociar la conectividad de la escorrentía a lo largo de la ladera con los diferentes patrones que representan dichos sectores.

CAPÍTULO 5

COMPORTAMIENTO HIDROLÓGICO DE LOS DIFERENTES CSS: ESCALA DE MICRO-PARCELA

Comienza con este capítulo el análisis del proceso de escorrentía en la escala jerárquica propuesta, correspondiendo éste al nivel de escala inferior, el de micro-parcela o parche. Aquí se centra la atención en la respuesta hidrológica de parcelas homogéneas en cuanto a las propiedades de los CSS. Se parte de datos procedentes de experimentos de simulación de lluvia ya disponibles para las laderas de estudio y otras áreas consideradas afines por sus características morfológicas y ambientales, cuya gama de cobertura se explica más abajo. Estos datos se someten a un *sistema de análisis* (ver apartado 3.3) que pretende la comprensión de la respuesta en base a las propiedades de forma o CSS. Posteriormente se presenta el *sistema de asignación* de la respuesta de cada CSS en cada área de estudio y la construcción de los *hidrogramas tipo*.

El trabajo se planteó ya inicialmente como una búsqueda de soluciones para poder atribuir propiedades de la escorrentía a lugares de los que se disponen de pocos datos, aunque suficientes para poder determinar unos rangos de respuesta hidrológica a determinados CSS presentes en las laderas y con la finalidad de simular numéricamente su respuesta.

5.1. DISPONIBILIDAD DE EXPERIMENTOS DE SIMULACIÓN DE LLUVIA (RFS)

En la Tabla 5.1 se muestra la relación de parcelas de simulación de lluvia disponibles, agrupadas según el CSS que representan y el sitio y orientación al que pertenecen. La columna correspondiente a las áreas de estudio informa además sobre los requisitos y carencias de simulaciones de lluvia (RFS) según las clases de componentes superficiales del suelo finalmente presentes en cada cartografía de cada área correspondiente.

Tabla 5.1 Relación de parcelas de simulación de lluvia disponibles para cada área de estudio en función de los criterios de análisis: sitio; orientación de la ladera; tipo de componente superficial del suelo. Para el suelo desnudo con presencia de fragmentos rocosos (RF): % de cobertura; posición y presencia de costra mineral superficial.

		Áreas de estudio			Áreas auxiliares						
Sitio		BE		CC	CC	GE		FI	AM		
Orientación		S	N	S	N	S	N	S	S		
NO-VEGETADAS	Afloramiento roca madre								AM10		
	% Cobertura FR	<25%	En superficie	BE54				GE37P	GE52P	FI01	AM09
			Embebida			--					
		25-70%	En superficie	BE58	BE08	--				FI06	
			Embebida		--	--				FI11	
		>70%	En superficie	BE59		CC58 CC56 CC55	CC03 CC05 CC09	GE37	GE52	FI09	AM08
			Embebida	BE51	--	--	CC07				
	Costra mineral (suelo seco)		sí	sí	no	no			sí	no	
	Hojarasca [BEN]		--		--				FI10		
	Otras: mixtas, etc				CC61				FI05	AM04 AM06 AM07 AM11	
VEGETADAS	Plantas muertas [BES-CCS]			--					AM03		
	Herbáceas	<i>Stipa tenacissima</i> [BE]	BE60	BE01	CC51	CC10			FI08	AM12	
		<i>Brachypodium retusum</i> [BE]	BE53	BE02 BE03					FI07	AM13	
	Arbustos		BE55	BE04 BE05 BE10	CC59	CC08					
	<i>Pinus halepensis</i>				--						
	Otras: mixtas, otras especies, etc		BE57	BE06 BE09	CC52 CC53 CC60	CC01 CC02 CC06					

FR: Fragmentos rocosos

-- NO-REQUISITO: Clase no existente en el área de estudio. No precisa asignación.

■ CARENCIA: sin disponibilidad de experimento de simulación de lluvia. Precisa asignación.

Las principales carencias para las áreas de estudio se encuentran en las clases de superficies con fragmentos de roca parcialmente embebidos, aunque únicamente presentes en las cartografías de la zona de BE (ver Tabla 5.1). Si bien, es una tipología de superficie con una escasa representación, con apenas 0.9% y 9.2% de cobertura total en BEN y BES respectivamente. Respecto a la carencia de la clase de <25 de pedregosidad en superficie (FR-25su) en Cocoll, señalar que el reducido tamaño de las manchas de este componente no hace posible la simulación de lluvia en términos de parcela pura. Tampoco la clase de vegetación arbórea (i.e. *Pinus halepensis*) permite la simulación. De las

tipologías de CSS correspondientes a la fracción seca de la vegetación (hojarasca o plantas muertas) y afloramientos rocosos, tampoco se tienen RFS en las áreas de estudio.

A excepción de la clase pinos, y FR-25em, el resto de carencias de RFS en las áreas de estudio son suplidas con los datos de las áreas auxiliares. La redundancia en CSS entre las áreas de estudio y auxiliares es necesaria para posibilitar el análisis de la respuesta en sus dos vertientes, tanto del efecto de los CSS en la respuesta, como del condicionamiento LOCAL de ésta. A este respecto, es especialmente valiosa la aportación del área de Finestrat (FIS) dado el amplio rango de CSS de las que se dispone dato (Tabla 5.1).

En balance, para las áreas de estudio se cubren 14 de los 28 casos de CSS por sitio necesarios, aunque variable en cada área de estudio. Pero, contabilizando la aportación de las simulaciones de las áreas auxiliares, los tipos de CSS quedan representados en el 85%, i.e. disponibles 11 de las 13 tipos generales de CSS (ver Tabla 5.2).

Tabla 5.2 Balance de la disponibilidad de parcelas de simulación de lluvia para los requisitos específicos de cada área de estudio y en global. Se contabiliza por tipos de CSS representados en la cartografía.

		CSS per sitio				CSS general	
		BES	BEN	CCS	total	áreas de estudio	+ áreas auxiliares
Requisito	CSS	12	10	6	28	13	13
Disponibilidad	CSS	7	4	3	14	7	11
	%	58.3	40.0	50.0	50.0	53.8	84.6
Carencia	CSS	5	6	3	14	6	2
	%	41.7	60.0	50.0	50.0	46.2	15.4

5.2. SISTEMA DE ANÁLISIS DE LA RESPUESTA A LA ESCORRENTÍA

En este marco de disponibilidad de datos se evidencia la necesidad de un complejo protocolo de asignación de la respuesta, que en esencia responda al requisito: diferentes CSS en diferentes contextos LOCALES. Y este cruce de factores debe abordarse en la fase de comprensión de la respuesta, lo cual configura un complejo y pormenorizado sistema de análisis. Esencialmente este sistema trata de discriminar en la medida de lo posible el efecto LOCAL ejercido por las características del sitio, del efecto producido por los CSS. Sin embargo la atención se focaliza precisamente en esta modulación de la respuesta por parte los CSS para luego alimentar el sistema de asignación posterior.

5.2.1. Panorama general: efecto LOCAL vs. efecto CSS

La primera expresión de la contraposición de los efectos LOCALES y de CSS se evidencia al contrastar la respuesta en las dos tipologías más básicas de CSS, la de los dominios de las superficies vegetadas

y no-vegetadas, entre sí y a lo largo del gradiente de áreas de estudio (Figura 5.2). Se utiliza para ello la F_c , tasa de infiltración final estable, como parámetro indicativo de la capacidad de infiltración de los suelos.

Existe un fuerte contraste de la respuesta entre superficies, siendo altamente significativa la diferencia entre áreas con y sin vegetación (Figura 5.2-lzq.). Es éste el ejemplo paradigmático del efecto de CSS en la respuesta, y que concuerda con la hipótesis ampliamente aceptada de que las superficies vegetadas actúan como sumideros de escorrentía frente a las áreas denudas como productoras de escorrentía (Noy-Meir, 1973; Yair y Klein, 1973; Nicolau *et al.*, 1996; Puigdefábregas y Sánchez, 1996; Bergkamp, 1998; Lavee *et al.*, 1998; Calvo-Cases *et al.*, 2003).

Este contraste en la respuesta se ve amortiguado a medida que avanzamos en el gradiente hacia condiciones más húmedas, reduciéndose las diferencias entre áreas vegetadas y no-vegetadas (Figura 5.2-Dcha.). Además, en este gradiente las capacidades de infiltración aumentan de modo generalizado, evidenciándose (i) el factor climático entre el régimen semiárido (BE) y subhúmedo (CC), y (ii) la componente micro-climática por la orientación de la ladera, Norte vs. Sur.

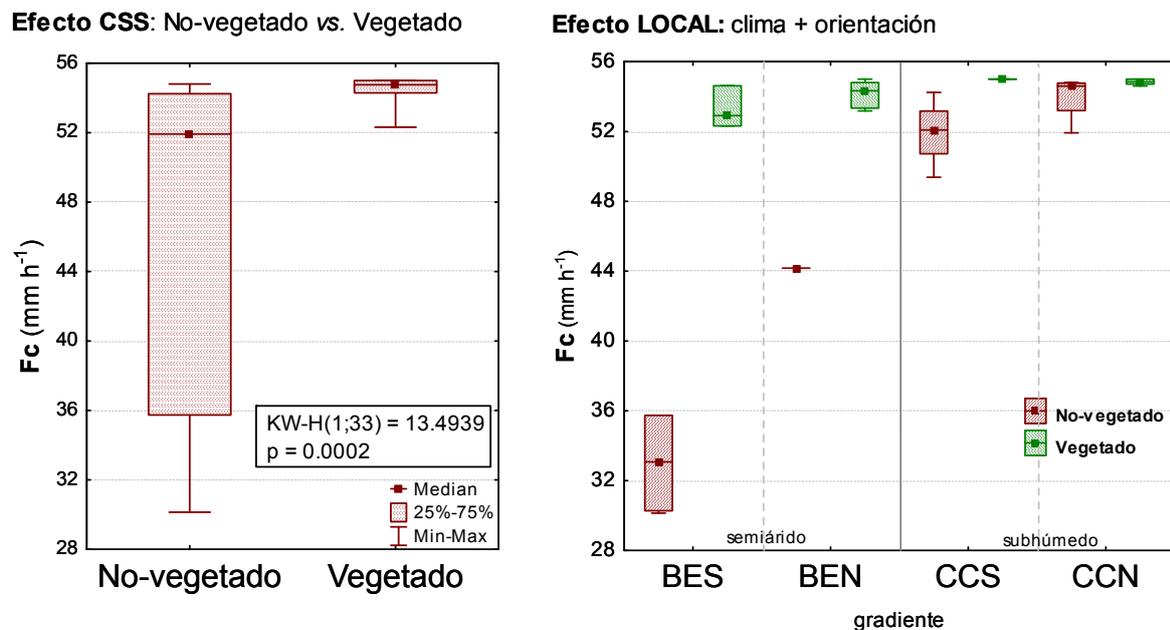


Figura 5.2 Distribución de los cuartiles del parámetro de infiltración final estable (F_c) de la ecuación de Horton en las parcelas de simulación disponibles para Benidorm y Cocoll. (lzq.) Contraste entre superficies no-vegetadas y vegetadas de ambas sitios (efecto CSS). (Dcha.) Gradiente de distribución por sitio según clima y orientación de superficies vegetadas y no-vegetadas (efecto LOCAL).

En síntesis, el carácter LOCAL se impone en la respuesta para las superficies no-vegetadas, tal y como muestra la marcada diferencia de la F_c entre sitios. Sin embargo, el efecto modulador de la respuesta por parte de la vegetación (i.e. efecto de CSS) es preponderante a las variaciones locales, sin que apenas existan diferencias entre sitios.

Este resultado dirige hacia una estrategia de análisis, y por tanto de asignación, distinta para superficies vegetadas y no-vegetadas. Concretamente, para el caso de las vegetadas se prescinde de

la consideración del efecto LOCAL como factor explicativo de la respuesta al considerarse irrelevante, centrándose únicamente en el efecto de CSS. Si bien, para las superficies no-vegetadas la respuesta se analiza desde el punto de vista del cruce de ambos factores.

5.2.2. Efecto LOCAL (sólo en no-vegetados): carácter del sitio

El efecto LOCAL se descompone en variables topográficas, concretamente en la (i) pendiente y la (ii) exposición de la ladera. Además, se establece un gradiente que aglutina todas variables intrínsecas de un (iii) sitio, cuya posición relativa en ese gradiente es la resultante de la combinación de todas ellas, en uno u otro sentido, en relación al resto de sitios.

En este apartado se ha optado por incluir en el análisis aquellas parcelas de simulación de cobertura mixta, esto es, compuestas por una mezcla de CSS que a pesar de no cumplir con las exigencias de homogeneidad para el análisis del efecto CSS, si resultan útiles para examinar el efecto LOCAL.

5.2.2.1. Factor pendiente

La pendiente es uno de los factores que se supone relevantes en la dinámica de la escorrentía, por lo que el propósito es descomponer su influencia relativa en cada faceta de la respuesta para poder valorar el alcance de su efecto LOCAL. Para ello se inspecciona la relación de la pendiente de la parcela con los tres parámetros de Horton (P_0 , α y F_c).

La Figura 5.3 muestra una fuerte relación de la pendiente con el **parámetro P_0** o tiempo de comienzo de la escorrentía (i.e. en condiciones de intensidad de lluvia constante). Es una relación exponencial que demuestra un fuerte declive de los tiempos de inicio de la escorrentía a medida que incrementa la pendiente, hasta llegar a un umbral de unos 20º de pendiente, en los que esa progresión se estabiliza. Así pues, la variable local pendiente incorpora un efecto significativo en la velocidad de respuesta de la superficie, con una elevada variación de los tiempos en el rango de pendientes inferiores a 10º, a partir del cual el efecto se estabiliza a unos tiempos de escasos minutos. El mecanismo subyacente se atribuye a la aceleración del flujo por el incremento de la energía potencial debido al aumento de la pendiente. El efecto modulador de cada CSS en la velocidad del flujo se presupone incorporado en la dispersión de los puntos, modificando la hidráulica particular dependiendo de las características concretas de la superficie (rugosidad).

En cambio el parámetro alpha (α) o velocidad de decaimiento de la tasa de infiltración, no muestra ninguna relación con la pendiente. Pero F_c (Figura 5.5izq.) muestra una moderada, aunque significativa, relación lineal con la pendiente, de modo que a medida que aumenta la pendiente la capacidad de infiltración de los suelos desciende. Fijándonos especialmente en la Figura 5.5 (dcha.) donde sólo aparecen las parcelas no-vegetadas puras, la relación va debilitándose a medida que aumenta la pendiente, presentando una mayor dispersión de los puntos en torno a la línea de tendencia, manteniendo en todas las pendientes valores elevados de F_c . Aunque soportado en pocos datos, parece que a medida que se incrementa la pendiente también aumenta el rango de respuesta

posible. Esto es, a bajas pendientes, son improbables tasas de infiltración muy bajas, mientras que el aumento de la pendiente diversifica el potencial de respuesta sin imposibilitar tasas elevadas de infiltración.

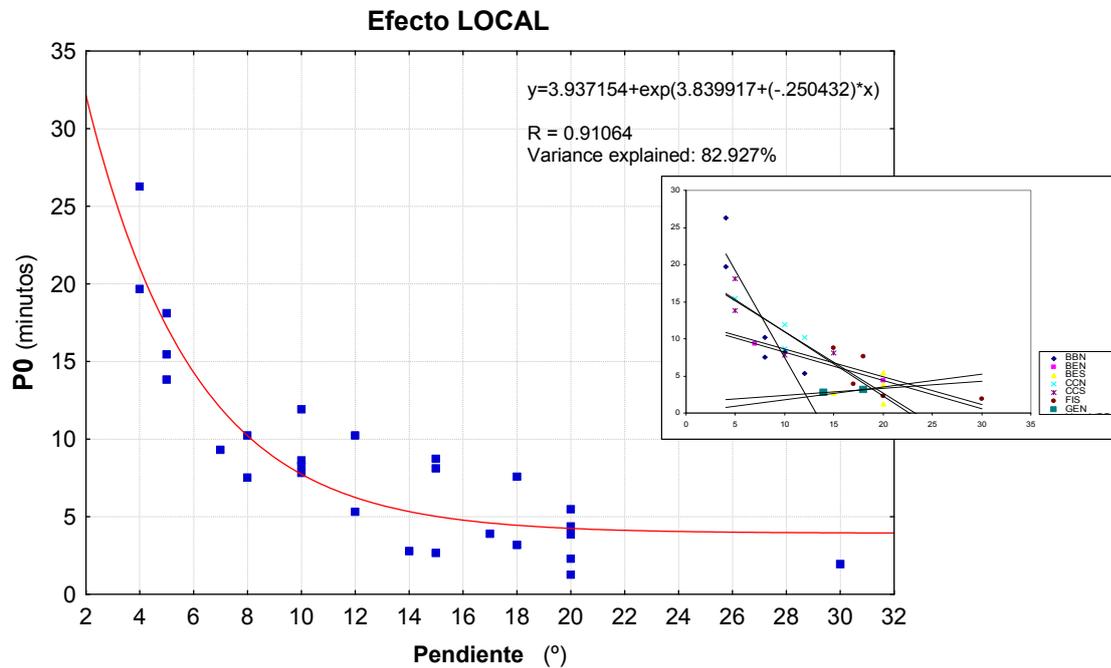


Figura 5.3 Relación de la pendiente de las parcelas de simulación no-vegetadas y mixtas con el parámetro P0 para todos los sitios disponibles.

En cualquier caso es la pendiente no es factor preponderante en la definición de la respuesta, en la que el grado de degradación y el propio efecto de los CSS deben participar considerablemente.

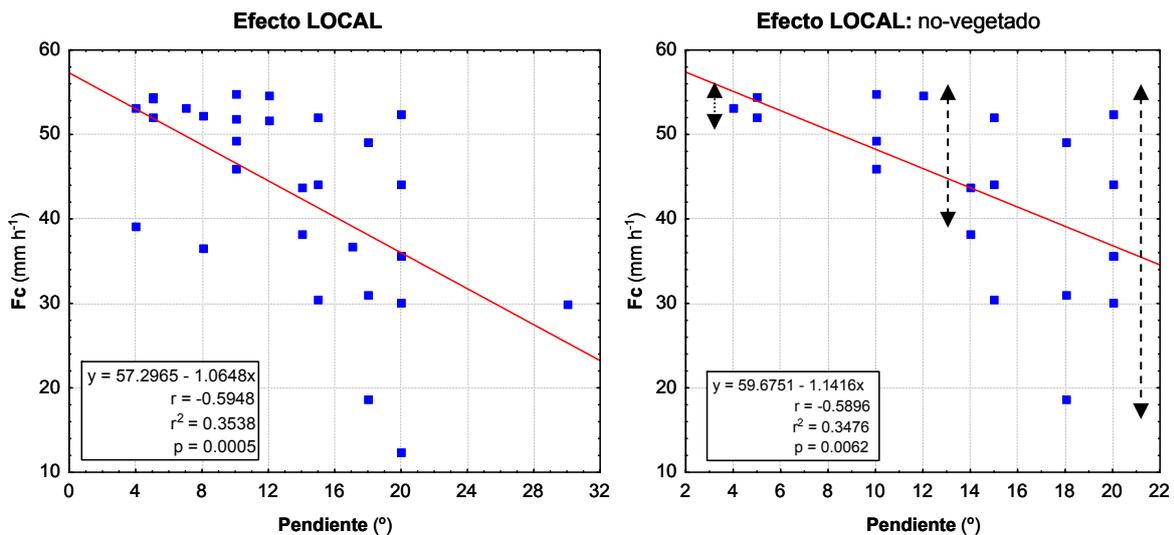


Figura 5.5 Relación de la pendiente de las parcelas de simulación con el parámetro Fc para todos los sitios disponibles. (Izq.) Para las parcelas de simulación no-vegetadas y mixtas. (Dcha.) Sólo para las parcelas no-vegetadas puras.

5.2.2.2. Factor gradiente de exposición de ladera: Norte vs. Sur

Los datos de los que disponemos permiten comprobar el efecto de la exposición en tres de las áreas, Benidorm (BE), Cocoll (CC) y Genovés (GE), de donde se tienen datos en ambas exposiciones. En todos los casos se trata de laderas enfrentadas muy próximas, presuponiendo constantes otros factores explicativos de la variable respuesta de la Fc, como son el clima, la litología, el historial de uso y degradación. Las pendientes son muy similares en ambas orientaciones.

En la Figura 5.6 se observa cómo en las tres zonas las tasas de infiltración son siempre significativamente superiores en la ladera de exposición Norte. Es destacable el marcado efecto que la componente micro-climática debida a un contraste de exposición es capaz de ejercer en la respuesta, que con los datos disponibles, parece más acentuado cuanto peores condiciones de infiltración se registran. La explicación de este contraste sólo la encontramos en el efecto producido por las diferencias de humedad del suelo que se presupone por las diferencias de insolación, siendo la exposición Norte la más favorable. Estas diferencias en el contenido de agua del suelo puede ser el desencadenante de otros ciclos de retroalimentación en el ciclo biótico y abiótico que resulten en una mejora significativa de las capacidades de infiltración general de los suelos.

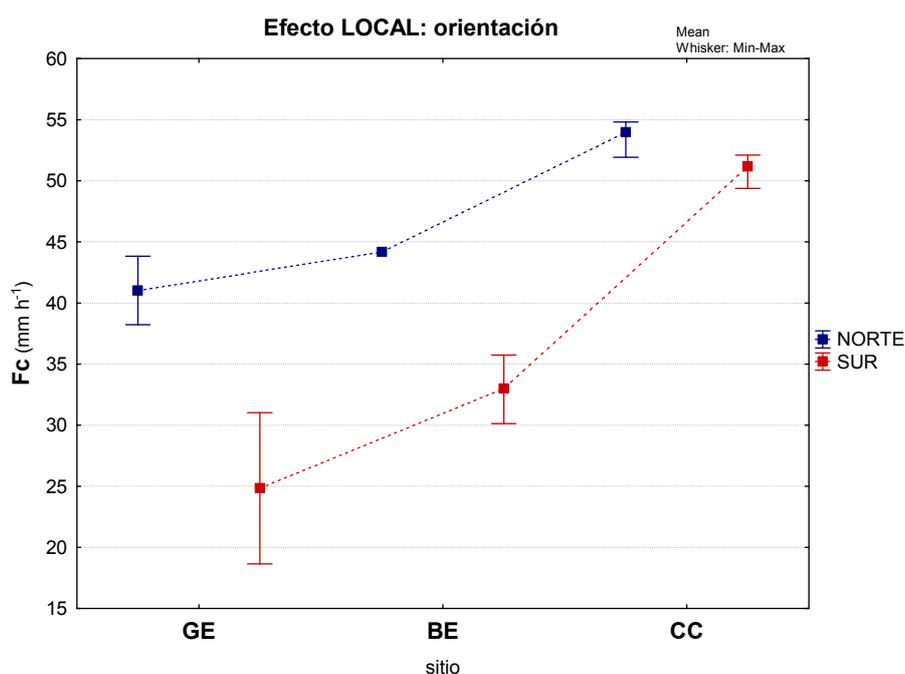


Figura 5.6 Distribución de la media y amplitud del parámetro Fc según la exposición de la ladera entre los sitios con disponibilidad de laderas confrontadas (Norte vs. Sur). GE: Genovés; BE: Benidorm y CC: Cocoll.

5.2.2.3. Factor gradiente de sitio

El factor *sitio* pretende aglutinar múltiples factores intrínsecos al área en cuestión, como son los condicionantes climático, topográfico y litológico-edáfico, además del historial de uso y degradación. No es por tanto una variable cuantitativa, sino que se considera a modo de *condición resultante*, la cual puede determinarse en relación a otras áreas. Para ello debe valerse de una variable respuesta

que compile los efectos interrelacionados de las características del sitio (i.e. a modo de variable instrumental o proxy).

En este caso se ha hecho uso de la variable Fc como indicativa de la capacidad de infiltración, y ésta, a su vez, de la cualidad funcional de los suelos como captadora de recursos hídricos del sistema. Ordenando de menor a mayor la variable respuesta Fc obtenemos un *gradiente de sitio* (Figura 5.7), que sin ser suficiente para hablar de grado de degradación, ofrece una escala relativa del potencial de captación de agua de la fracción de suelo no-vegetado.

Del gradiente resultante según este criterio, se obtiene una ordenación de sitios que arroja información sobre el peso relativo que puede alcanzar cada factor intrínseco a ese carácter local al que aquí nos referimos (Figura 5.7). Se observa cómo el clima, a pesar de su reconocida influencia (Lavee *et al.*, 1998), es un factor únicamente capaz de discriminar en estas áreas entre dominio sub-húmedo y semi-árido, si bien el *gradiente de sitio* dentro del dominio semi-árido no corresponde en absoluto con el gradiente pluviométrico (Figura 5.7), indicando la intervención de otros factores.

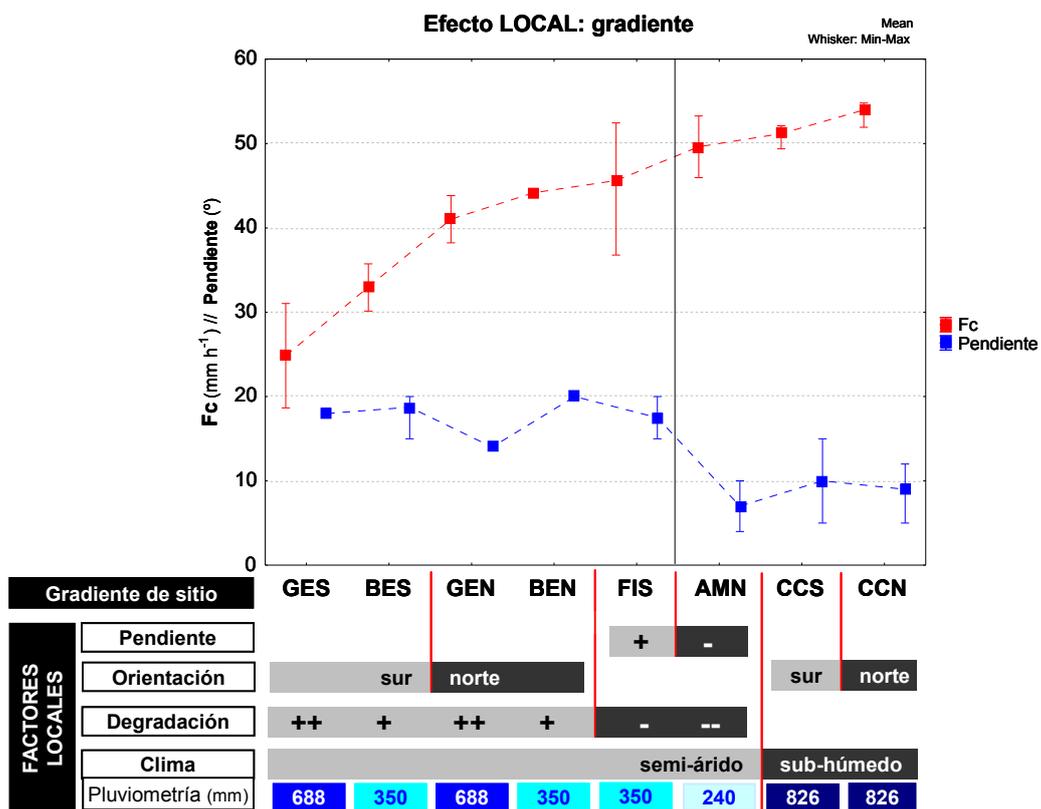


Figura 5.7 Gradiente de sitio a partir de la ordenación de la variable proxy Fc (ver texto) y la respectiva variación del factor pendiente en ese gradiente para las parcelas de simulación no-vegetadas.

Enfrentando el *gradiente de sitio* resultante con la respectiva variación de la pendiente a lo largo de esta gradación (Figura 5.7), se observa cómo la pendiente, a escala de sitio, no es un factor con una clara correlación con el progresivo incremento de la Fc, apuntando hacia la participación de otros

factores en la variable respuesta. Sin embargo, sí se detecta un umbral que establece dos sectores en el gráfico de acuerdo con su rango de pendiente, aquel con valores más bajos (en torno a 10°) que coinciden con los sitios de mayores capacidades de infiltración, y el resto de sitios de menor infiltración de media con pendientes más elevadas (entre 15° y 20°). Este comportamiento dual en los dos extremos es el responsable de que se obtenga una correlación moderada y significativa en la Figura 5.8, donde se enfrentan los valores medios por sitio de las variables pendiente y Fc, sin que internamente en ambos rangos de pendiente exista una clara relación.

Descartada la pendiente como un factor dominante en la respuesta a la infiltración, se considera el estado de degradación de los suelos como un factor fundamental para explicar el aparente desajuste en el *gradiente de sitios* atendiendo a la pluviometría, especialmente al observar cómo Aguamarga (AMN) y Finestrat (FIS) con 250 y 350 mm de precipitación respectivamente, rebasan ampliamente en capacidad de infiltración a Genovés (GES y GEN) con 688 mm (Figura 5.7). Genovés es un área con un reciente incendio en el momento de realización de las simulaciones de lluvia, mientras que las propiedades de los suelos de Finestrat y Aguamarga se saben más óptimas respecto de propiedades estructurales de agregación y de contenido en materia orgánica que Benidorm.

El factor exposición de la ladera puede considerarse el siguiente factor explicativo de la respuesta cumpliéndose en todos los casos de laderas confrontadas Norte-Sur (GE, BE y CC) una mejora de las capacidades de infiltración en la orientación de umbría (Figura 5.7), las cuales disfrutaban de unas condiciones micro-climáticas de menor presión evapo-transpirativa por la menor insolación debido a la orientación.

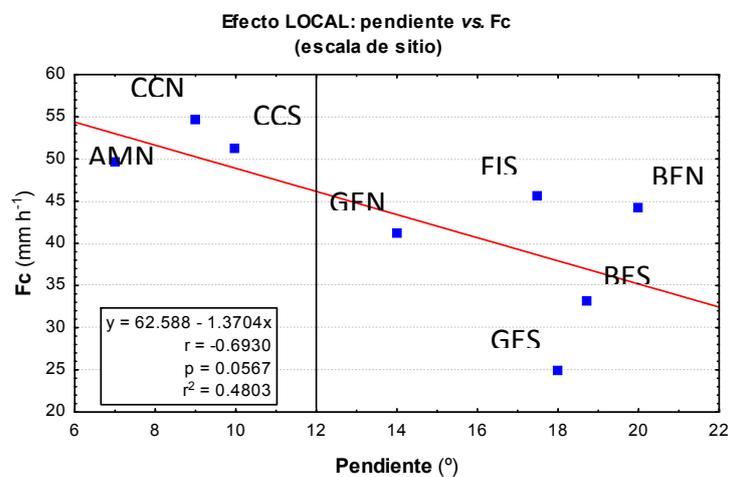


Figura 5.8 Relación de la pendiente con el parámetro Fc en valores medios de las parcelas no-vegetadas por sitio.

Y finalmente el factor pendiente se constituye como el más residual, pero aun así parece significativo para explicar que Aguamarga, pese a su escasa pluviometría, se posicione por delante de Finestrat respecto de las capacidades de infiltración del suelo (Figura 5.7). Las bajas pendientes de la ladera de Aguamarga sumado a la menor presión de usos del suelo, da como resultado unas condiciones que podemos decir agradativas respecto a la calidad de la matriz de los suelos, y por tanto de mayor infiltrabilidad.

5.2.3. Efecto CSS: modulación de la respuesta

El propósito de este apartado es adquirir conocimiento sobre el efecto modulador que introducen los CSS en la respuesta a nivel de proceso. Modulador en el sentido que modifican de algún modo la respuesta primaria resultado del carácter LOCAL del sitio. El alcance de esta modulación es variable en función de la naturaleza de cada CSS, pudiendo incluso llegar a ser un factor preponderante en la respuesta, y con ello rebasar el condicionante LOCAL. Este es el caso paradigmático de la vegetación, cuyos mecanismos asociados de retroalimentación consiguen una respuesta de *sumidero universal* en este tipo de ambientes.

Así pues, este apartado analiza de manera independiente tres grupos de CSS dada su propia naturaleza y su consiguiente diferencia en los procesos: (i) superficies NO-VEGETADAS, que aglutina todos los rangos de pedregosidad y los afloramientos de roca madre; (ii) MATERIA SECA que incluye la hojarasca y plantas muertas y (iii) superficies VEGETADAS.

5.2.3.1. Superficies NO-VEGETADAS

Esta subcategoría de superficies es muy relevante en la comprensión y caracterización de la respuesta a la escorrentía y corresponde a aquellos CSS implicados en el ciclo abiótico de retroalimentación relativo a los procesos de erosión (Kirkby *et al.*, 2002), y que de algún modo constituyen diferentes grados de evolución con sus respectivas dinámicas de respuesta en los flujos de agua y sedimentos.

Se realiza un análisis exhaustivo que comienza con (a) una primera aproximación en la comparación de las curvas de escorrentía para detectar las propiedades superficiales que determinan la dinámica de la respuesta. Posteriormente, (b) se relacionan las propiedades superficiales relevantes con los correspondientes parámetros de Horton (P_0 , α y F_c). Además, se incluye (c) un apartado dedicado al nivel de correspondencia de los datos al modelo conceptual de respuesta según cobertura y posición de los FR de Poesen (1990), en este caso considerando la respuesta global usando el coeficiente de escorrentía del experimento. Finalmente y a modo de síntesis, (d) se estructuran los resultados obtenidos como de gradientes de respuesta de los diferentes CSS por cada parámetro de Horton. Este último apartado pretende recopilar las conclusiones a nivel de proceso respecto de los efectos de los CSS en la respuesta, que servirán posteriormente para la extrapolación de resultados en la fase de asignación.

a. Análisis comparativo de curvas de escorrentía (hidrogramas)

A partir de la comparación de la forma de las curvas de escorrentía o hidrogramas en función de las características superficiales de las parcelas de simulación se ha podido analizar el efecto relativo de cada característica en la dinámica hidrológica del suelo (efecto CSS). Se hace referencia a diferentes atributos respecto de los fragmentos rocosos y de la fracción de suelo desnudo asociada. Además se describe la dinámica de la ROCA y, a modo de testigo, se pone de manifiesto para una de las

tipologías de CSS el efecto del contraste de exposición de la ladera. La síntesis de los resultados de este apartado permite determinar las *propiedades superficiales* clave que modulan a nivel de CSS la dinámica de la respuesta.

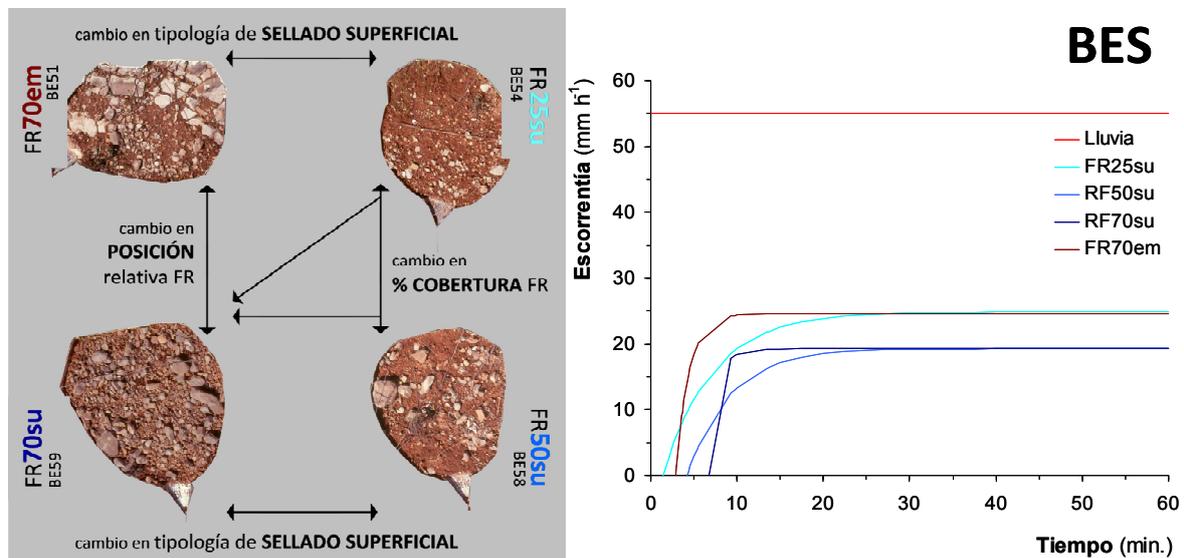


Figura 5.9 (Izq.) Diagrama de variación de las características superficiales de las parcelas sin vegetación de la ladera Sur de Benidorm (BES) con las diferentes opciones de comparación de curvas. (Dcha.) Correspondientes curvas de escorrentía (mm h^{-1}).

El uso de simulaciones de lluvia en condiciones de suelo seco permite discriminar de manera óptima el efecto de los diferentes componentes superficiales, sin que diferencias de humedad antecedente interfiera en la interpretación de la respuesta.

El diagrama de la Figura 5.9 resume las diferencias cualitativas entre las superficie sin vegetación de las cuatro parcelas disponibles para el análisis en la ladera de Benidorm Sur (BES), que considera cambios en: (i) el porcentaje de cobertura de fragmentos rocosos; (ii) la posición relativa de las piedras con respecto a la superficie del suelo (parcialmente embebida o sobre la superficie); y (iii) la tipología de sellado superficial presente en función de las características superficiales. Se consideran dos tipos de sellado superficial, el *sellado estático* que es el producido por la propia superficie de los fragmentos de roca, especialmente efectivo cuando están parcialmente embebidos en el suelo, y el *sellado dinámico* provocado por la presencia de material fino desagregado que obstruye la superficie del suelo en los primeros milímetros del perfil. Destacar que la fracción de suelo desnudo en esta área de estudio presenta una elevada susceptibilidad al encostramiento superficial por este mecanismo de disgregación.

Efecto posición relativa de los fragmentos rocosos: en superficie vs. embebida

Se comparan las curvas de las clases del rango máximo de pedregosidad FR70em y FR70su, en las que se observa un cierto paralelismo (Figura 5.10), donde la posición embebida se comporta de forma más favorable a la escorrentía, esto es con un menor umbral de precipitación para su inicio (P0) y

con una menor capacidad de infiltración (F_c). Sin embargo la estabilización de las curvas (α) se alcanza casi simultáneamente (10 min. aprox.), siendo por tanto una respuesta más abrupta en el caso de la posición en superficie.

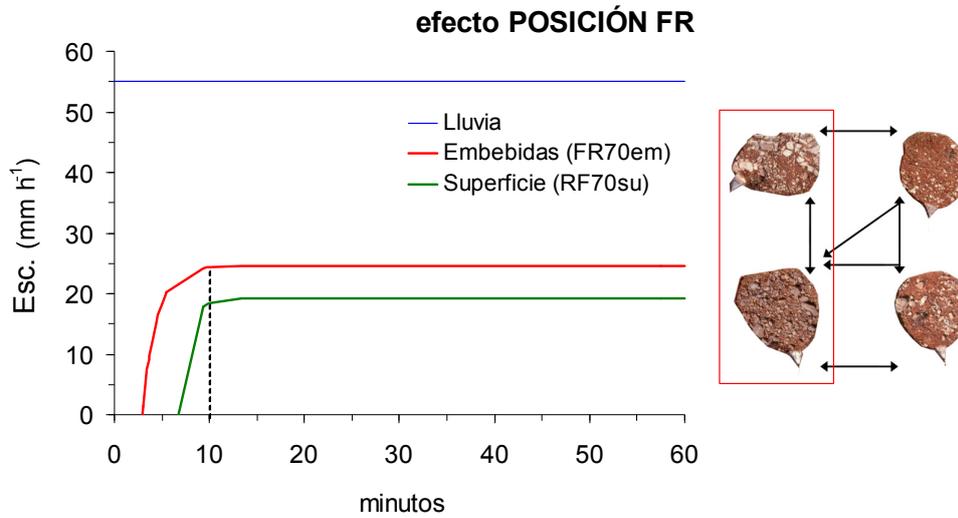


Figura 5.10 Efecto del cambio en la posición relativa de los fragmentos rocosos (FR) embebida vs. en superficie, mediante la comparación de las curvas de escorrentía FR70su (BE59) y FR70em (BE51).

Efecto % de cobertura de fragmentos rocosos: rango completo de clases de cobertura

En este caso la comparación se realiza entre las tres parcelas que cubren los tres rangos de % cobertura en posición en superficie (Figura 5.11), pudiéndose así valorar el gradiente completo de respuesta. Respecto de los tiempos de inicio de la escorrentía (P_0) se observa una progresiva ralentización de la respuesta a medida que se incrementa la cobertura de FR, que se relaciona con aspectos de hidráulica superficial derivados de la rugosidad superficial.

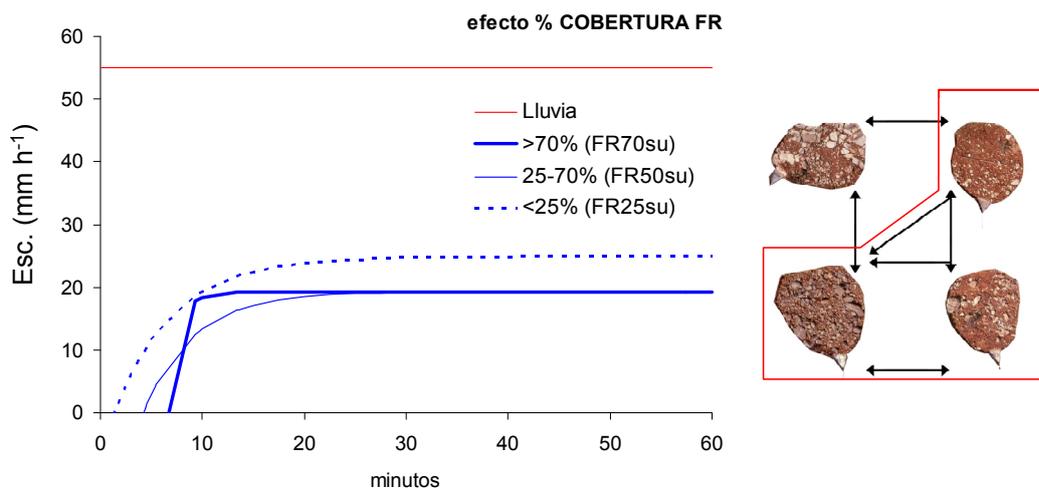


Figura 5.11 Efecto del cambio en el % de cobertura de los fragmentos rocosos (FR), mediante la comparación de las curvas de escorrentía FR70su (BE59), FR50su (BE58) y FR25su (BE54).

La capacidad de infiltración final (F_c) se ve favorecida en condiciones de mayor pedregosidad relacionado con la protección de la superficie ante los impactos de las gotas de lluvia en el suelo desnudo. La velocidad de estabilización del flujo (α) se hace más abrupta en la clase FR70su, lo que denota una escasa dinamicidad de los procesos superficiales asociados a esta clase con respecto a las otras dos parcelas cuyas curvas muestran una trayectoria más tendida. En balance se observa como la clase FR50su se posiciona en una respuesta intermedia respecto a los dos extremos de cobertura.

Efecto diferentes tipologías de sellado superficial: dinámica vs. estática

El efecto del cambio en la tipología se inspecciona bajo dos situaciones de intensidad de sellado superficial respecto de la fracción de cobertura total de la parcela. La Figura 5.12 muestra la situación con predominio de superficie sellada con la comparación de las parcelas FR70em (BE51) y FR25su (BE54), representativas de la tipología estática y dinámica respectivamente. En este caso se pierde el paralelismo de las curvas mientras se mantiene la magnitud final de la tasa de infiltración final estable (F_c). La presencia del sellado, con independencia de la tipología, ejerce un papel similar una vez traspasado un umbral determinado de precipitación. La diferencia fundamental radica en el tiempo necesario para alcanzar una tasa de escorrentía constante (α). Podemos hablar de un tipo de *sellado estático* en el caso de las piedras embebidas, en el que la demora hasta la tasa constante de escorrentía es debida al aumento de la rugosidad superficial. Sin embargo, el proceso de sellado por desagregación de la fracción mineral fina presenta una dinámica compleja como se recoge en la bibliografía (Roth y Helming, 1992), por lo que esta demora es mayor y nos permite hablar de un *sellado dinámico*. Respecto del tiempo de inicio de la escorrentía (P_0) es menor para la costra de fracción fina por la menor rugosidad de la superficie, y por tanto una velocidad del flujo superficial mayor.

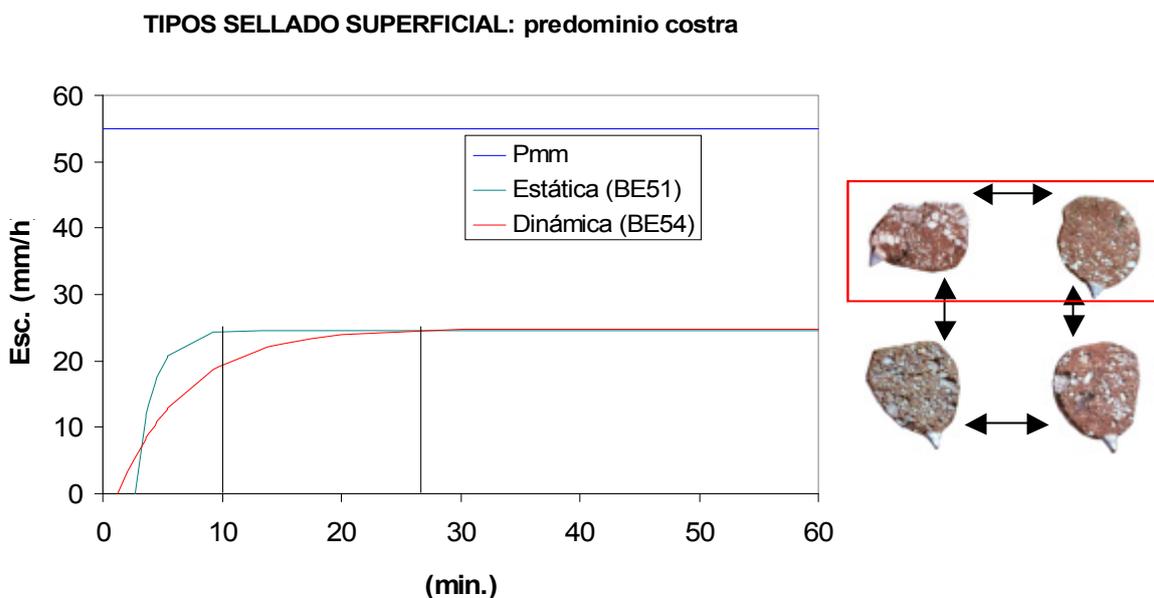


Figura 5.12 Efecto del cambio en el tipo de sellado superficial, dinámico vs. estático, en condiciones de predominio del sellado, mediante la comparación de las curvas de escorrentía FR25su (BE54) y FR70em (BE51).

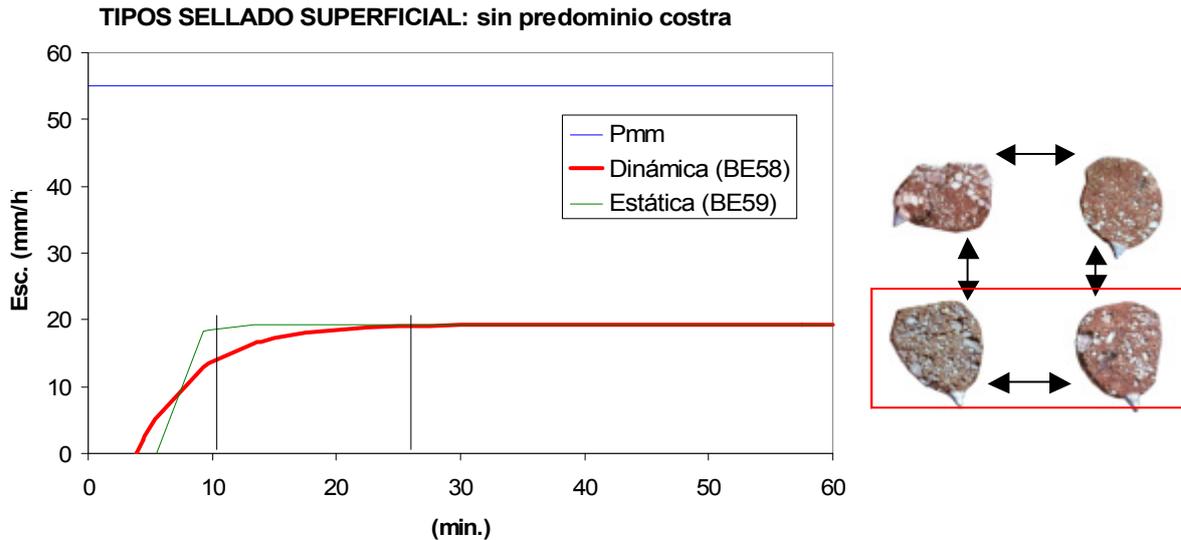


Figura 5.13 Efecto del cambio en el tipo de sellado superficial, dinámico vs. estático, en condiciones de no predominio del sellado, mediante la comparación de las curvas de escorrentía FR50su (BE58) y FR70su (BE59).

La situación análoga a la anterior pero esta vez sin predominio de superficie sellada respecto al total (Figura 5.13) compara las parcelas FR50su (BE58) y FR70su (BE59). En ambos casos se asume que la superficie sellada de manera efectiva se reduce a los espacios entre los fragmentos rocosos sobre la superficie, en la parcela FR70su estos espacios son ocupados por pedregosidad embebida y en la FR50su por material fino desagregado y en forma de costra. En esta situación en el que el sellado no es el componente predominante, ocurre lo mismo que en el caso anterior entre parcelas, F_c equiparables pero con P_0 y α con valores diferentes (Figura 5.13), con la única diferencia que al predominar los componentes con mayores capacidades de infiltración (pedregosidad en superficie), la F_c aumenta disminuyendo la tasa de escorrentía (Figura 5.13). En este ejemplo se vuelve a observar el carácter más dinámico de la costra mineral de fracción fina con respecto al sellado producido por la posición embebida de las piedras.

Efecto del tamaño de los fragmentos de rocosos.

Para este propósito se hace uso de los experimentos de simulación del área de estudio de Cocoll sur (CCS) de donde se dispone de 3 réplicas en la clase de CSS de FR70su, pero con una variación en el tamaño de los fragmentos rocosos (Figura 5.14). Destacar los elevados valores de F_c que aquí se alcanzan (entre 54.2 y 49.4 mm h^{-1}) respecto del área de Benidorm (BES) en la misma clase de superficie (35.7 mm h^{-1}), denotando una elevada capacidad de infiltración de los suelos en el área de Cocoll. Este marcado contraste entre sitios es debido al efecto LOCAL, en el que CCS con clima sub-húmedo posee unas mejores propiedades edáficas (estructurales, contenido en materia orgánica, etc) que la zona semi-árida de Benidorm (Boix-Fayos, 2000).

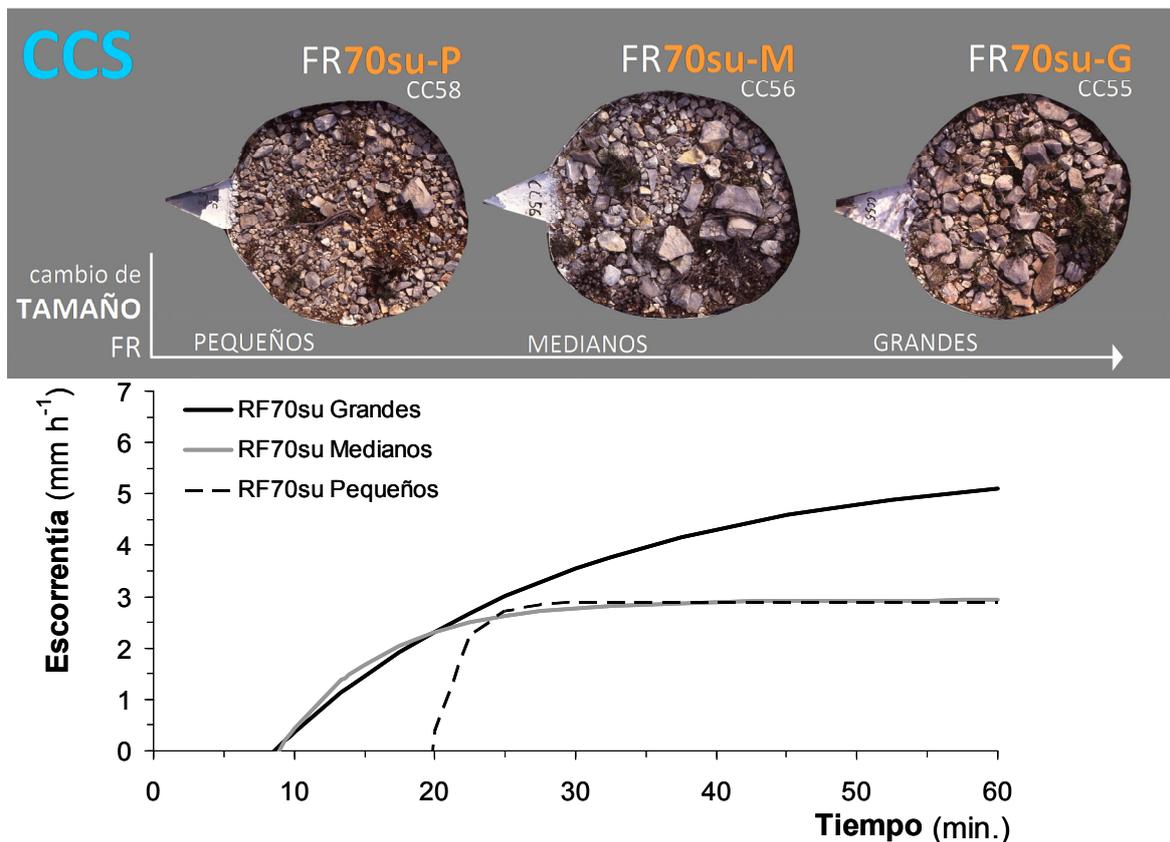


Figura 5.14 Efecto del cambio en el tamaño de fragmentos rocosos (FR), mediante la comparación de curvas de escorrentía de las parcelas de Cocoll de FR70su en superficie, donde se observa un gradiente de tamaño de piedras: pequeños (CC58), medianos (CC56) y grandes (CC55).

Se observa una disparidad en la respuesta entre los FR grandes y pequeños, y un comportamiento intermedio para los de tamaño medio o mezcla de tamaños (Figura 5.14). Si bien la parcela aquí correspondiente con el tamaño pequeño (CC58) tiene un comportamiento semejante a la parcela FR70su homóloga de BES (BE59) con un relativo retraso en el inicio de la escorrentía y una rápida estabilización del flujo (Figura 5.14), se advierte en la curva de la parcela CC59 una modificación de ese patrón de respuesta con el incremento del tamaño de los FR: anticipación en el inicio, estabilización más lenta y una mayor tasa de escorrentía. Explicamos estas diferencias por un efecto en la hidráulica del flujo dependiente del tamaño de los FR. Señalar que si bien este efecto no cabría que tuviese una alteración importante en la *respuesta tipo* del CSS en cuestión (FR70su), para el caso de Cocoll en que las magnitudes de escorrentía son muy pequeñas, este efecto parece verse magnificado, si bien nos sirve para analizar la modulación de la respuesta por el cambio de tamaño de los FR.

Respecto del marcado anticipo del inicio de la escorrentía en los tamaños grande y mediano/mixto (Figura 5.14) señalar que las parcelas tienen una mayor pendiente respecto de la de tamaño pequeño (10º, 15º y 5º respectivamente). Estas diferencias de tiempo están en el orden de magnitud que se fija en la relación exponencial entre pendiente y P0 que se presentaba en la Figura 5.3. Si bien no se descarta, además, un reforzamiento de estas diferencias debido al descenso de la tortuosidad hidráulica superficial con el incremento del tamaño de los FR acelerando así el flujo de agua.

La mayor dinamicidad de la respuesta en los tamaños más grandes, lo cual se refleja en una curva más tendida (menor α) (Figura 5.14), se atribuye a que con el incremento de tamaño de FR se aumenta la complejidad en el modo en que contribuyen las áreas fuente, en este caso los fragmentos rocosos, al flujo de escorrentía. Se considera un modo de contribución multinivel, que corresponde con los diferentes estratos o niveles de altura de los fragmentos rocosos.

Finalmente, el incremento de la escorrentía se explica porque a mayor tamaño de los FR aumenta la fracción total de superficie cubierta por FR (lo que denominamos el sellado estático), y como consecuencia de ello, desciende la densidad de espacios de infiltrabilidad de las áreas desnudas subyacentes a los FR. Esta circunstancia puede repercutir en un descenso relativo de la capacidad de infiltración del suelo.

Afloramientos de roca madre

En términos generales, es ésta una clase de CSS cuya respuesta depende claramente del tipo de roca y de su estado de fragmentación. Sólo se dispone de una parcela de simulación de esta categoría en el área de Aguamarga-AMN (Figura 5.15). Sin embargo, todas las áreas de estudio de las que presentamos resultados de simulación de lluvia presentan sustrato calcáreo. En el caso de CC, BE, GE y FI son calizas, mientras que en el área de AM, el sustrato rocoso que aflora en la ladera corresponde una costra calcárea petrocálica de origen edafogénico, con una elevada fragmentación por fisuras verticales. A pesar de tratarse de sustratos de naturaleza diferente, a efectos funcionales presenta una misma apariencia en superficie, y por tanto con una dinámica de respuesta a la escorrentía perfectamente equiparable y extrapolable a todas los sitios aquí considerados.

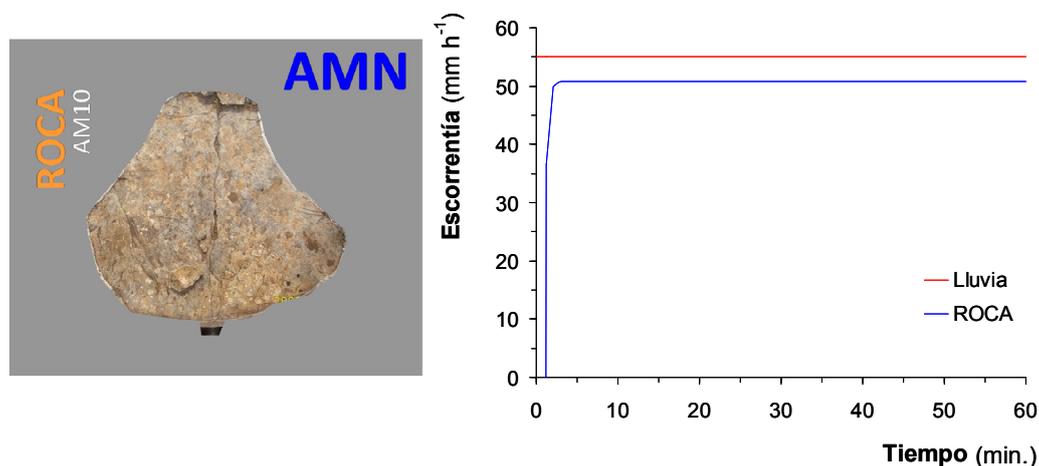


Figura 5.15 Curva de escorrentía (mm h^{-1}) de la parcela perteneciente a la clase de afloramiento rocoso (ROCA) del área de Aguamarga (AM10).

La curva de escorrentía de la simulación (Figura 5.15) muestra unos resultados muy esperables según las propiedades de las calizas. Una muy escasa permeabilidad, limitándose a una relativa porosidad debida a la meteorización superficial y a las fisuras que presente la roca aflorada.

La respuesta es extremadamente rápida (Figura 5.15), tanto en el comienzo de la escorrentía (al primer minuto) como en alcanzar la estabilización (valor muy alto de α). Aunque con un F_c muy bajo ($F_c = 4.2 \text{ mm h}^{-1}$), la roca presenta cierto grado de permeabilidad por la presencia de fisuras, pues la relativa porosidad superficial sólo tiene efecto hasta el momento del encharcamiento. Otro aspecto complementario que puede afectar a los tiempos de respuesta, aunque sin afectar a la tasa de infiltración final estable (F_c), es la relativa rugosidad de la superficie de la roca, en el sentido de mostrar concavidades que precisan colmatarse de agua antes de contribuir a la escorrentía. Éste es un aspecto que se ha preferido obviar por la evidente complejidad en la tipificación de esta respuesta según esta variable.

Efecto LOCAL por contraste de exposición de la ladera: norte vs sur

Complementariamente se hace uso de la única parcela de no-vegetación de Benidorm Norte (BE08), que pertenece a la tipología de entre 25-70% FR en superficie (FR50su), de la que además se tiene homóloga en la ladera BES (BE58) (Figura 5.16). Estas dos parcelas se utilizan de *curvas control*, cuyas respuestas deben seguir dinámicas análogas de acuerdo al tipo específico de CSS (efecto de CSS), pero que a su vez, registren algún nivel de contraste atendiendo a la situación de exposición enfrentada a la que pertenecen (efecto LOCAL).

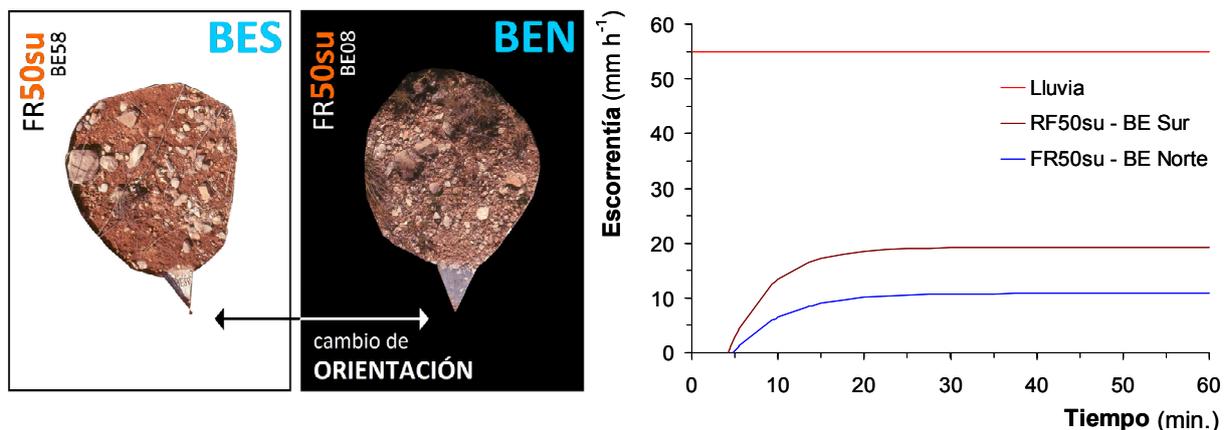


Figura 5.16 Efecto LOCAL por el cambio de orientación de la ladera, Norte vs. Sur, mediante la comparación de las curvas de escorrentía de la tipología FR50su de la exposición Sur (BE58) y la Norte (BE08).

Ambas curvas muestran unas trayectorias semejantes (Figura 5.16) lo que denota una misma ocurrencia de subprocesos asociados a la respuesta, esto es, un efecto CSS congruente. Por un lado registran casi un simultáneo inicio de la escorrentía (P_0) que se asocia al mismo grado de rugosidad entre parcelas, aunque con un leve retraso de la parcela de BEN que se relaciona a la menor pendiente de esta ladera. Además ambas comparten una forma de la curva tendida (valores bajos de α) alcanzando la tasa de infiltración final estable (F_c) alrededor de los 20 minutos desde el comienzo de la lluvia, lo que se asocia a una respuesta dinámica de la costra mineral.

La importante diferencia entre ambas respuestas radica precisamente en las tasas de infiltración final estable (F_c), claramente mayores en la ladera de exposición Norte, que aquí relacionamos con el que

denominamos efecto LOCAL. Puesto que se trata de laderas enfrentadas, se les atribuye idénticas las variables climática, litológica y de historial de uso y presión antrópica, señalando a la variación microclimática por el contraste de insolación entre ambas laderas como responsable de las diferencias en las capacidades de infiltración del suelo. Estas diferencias de insolación repercuten en el balance hídrico del suelo y por tanto en el agua disponible para la vegetación, lo que desencadena ciclos de retroalimentación en el suelo que favorecen las capacidades de infiltración del suelo en la orientación de umbría, con una menor tasa de mineralización de la materia orgánica.

A modo de síntesis, la Tabla 5.3 resume los diferentes efectos relativos de cada característica de los CSS en el rango completo de superficies con presencia de FR. Se desagrega por cada uno de los tres aspectos de la respuesta que corresponden con los tres parámetros de Horton. A cada uno de estos aspectos de la respuesta se le asocia la propiedad superficial clave inferida a partir del análisis comparativo de las curvas. El resultado son los diferentes gradientes de comportamiento, tanto de la respuesta de la escorrentía como de las diferentes propiedades superficiales, de los cuales se observa una casi completa correspondencia entre ambos a lo largo de todos los atributos de CSS (% cobertura, posición, tamaño y tipo de sellado) lo cual robustece la asignación de esa propiedad clave para explicar la respuesta.

Tabla 5.3 Síntesis de resultados de la comparación de curvas de escorrentía del efecto CSS de las superficies no-vegetadas. Se presentan los gradientes de respuesta por parámetro de Horton y de sus correspondientes propiedades superficiales clave inferidas del análisis, en función de los diferentes atributos de los CSS. FR: fragmentos rocosos; su: en superficie; em: embebidos; P: pequeño; G: grande; Din.: dinámico; Est.: estático.

	% COBERTURA FR			POSICIÓN FR		TAMAÑO FR		TIPOLOGIA SELLADO	
	25	50	70	su	em	P	G	Din.	Est.
Inicio escorrentía (P0)	-	+	++	+	-	+	-	--	--
Rugosidad (tortuosidad hidráulica)	-	+	++	+	-	+	-	--	--
Velocidad estabilidad (α)	-	+	++	+	-	+	-	-	+
Dinamicidad de la superficie	-	+	++	+	-	+	-	-	+
Tasa infiltración final estable (Fc)	-	+	+	+	-	+	-	=	=
Sellado efectivo + protección superficie	-	+	++	+	-	+	-	=	=

	gradiente:		
respuesta	-	+	++
propiedad superficial CLAVE	-	+	++
sin efecto	--		

b. Modelos de respuesta según parámetros de Horton: funciones de interpolación a partir de las propiedades superficiales

Sirviéndose de las conclusiones del apartado anterior, aquí se realiza el análisis cuantitativo de las relaciones observadas entre propiedades superficiales y la respuesta, en sus diferentes manifestaciones (i.e. inicio de la escorrentía; velocidad de estabilización y capacidad de infiltración final), lo cual servirá para la posterior fase de asignación, además de corroborar con datos de más sitios lo inferido en la parte de comparación de curvas a propósito de las propiedades superficiales clave que marcan la respuesta.

En esencia se trata de conseguir la gradación de respuesta del rango completo de CSS, y a partir de ahí obtener una función de ajuste que permita extrapolar la variable respuesta de los diferentes CSS, basado todo en la relación de la propiedades superficiales con el comportamiento a la escorrentía (aproximación *proceso-patrón*).

Inicio de la escorrentía (P0): Pendiente modulada por la rugosidad superficial

Si bien el factor LOCAL que determinaba el inicio de la escorrentía era la pendiente (Figura 5.3 del apartado 5.2.2), eliminando este factor al comparar de las curvas de una misma ladera se ha observado que la *rugosidad superficial* es la propiedad del CSS que modula la respuesta *in situ*. En la Figura 5.17 se muestra el gradiente de los CSS resultante en función de su rugosidad superficial, la cual, partiendo de la ROCA, va incrementándose en función de la cobertura y la posición relativa de los FR. El efecto de la posición de los FR prevalece sobre el incremento de cobertura cuando ésta supera el 25%.

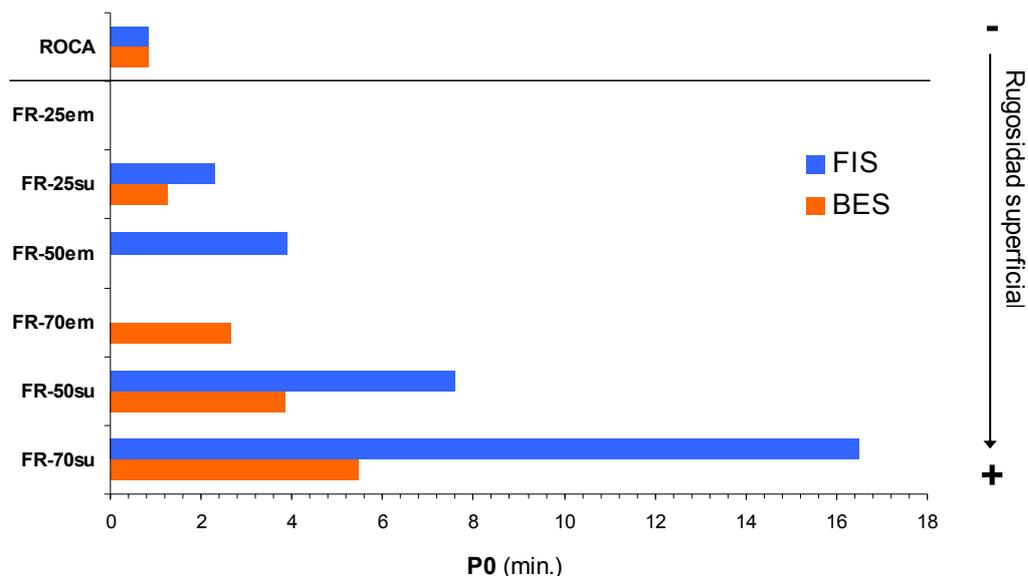


Figura 5.17 Secuenciación de CSS en base a la respuesta del parámetro P0 de las parcelas de Finestrat (FIS) y Benidorm sur (BES). Gradiente que responde a la propiedad superficial de rugosidad del suelo.

La cuantificación de la rugosidad superficial se ha estimado a partir del porcentaje de cobertura y la posición de los FR. La Figura 5.17 muestra las diferentes rectas de ajuste, donde para todos los sitios se ha usado la respuesta extrema de la ROCA de Aguamarga (parcela AM10), la cual se estima como el CSS de menor rugosidad y con el inicio de la escorrentía más rápido. Puesto que presenta una respuesta prácticamente inmediata ($P0 = 0.8' = 49''$) a pesar de su baja pendiente, el error de extrapolación al resto de laderas con mayor pendiente se considera insignificante. Así se amplía el rango de CSS por cada sitio posibilitando el establecimiento de ajustes lineales individualizados (Figura 5.18).

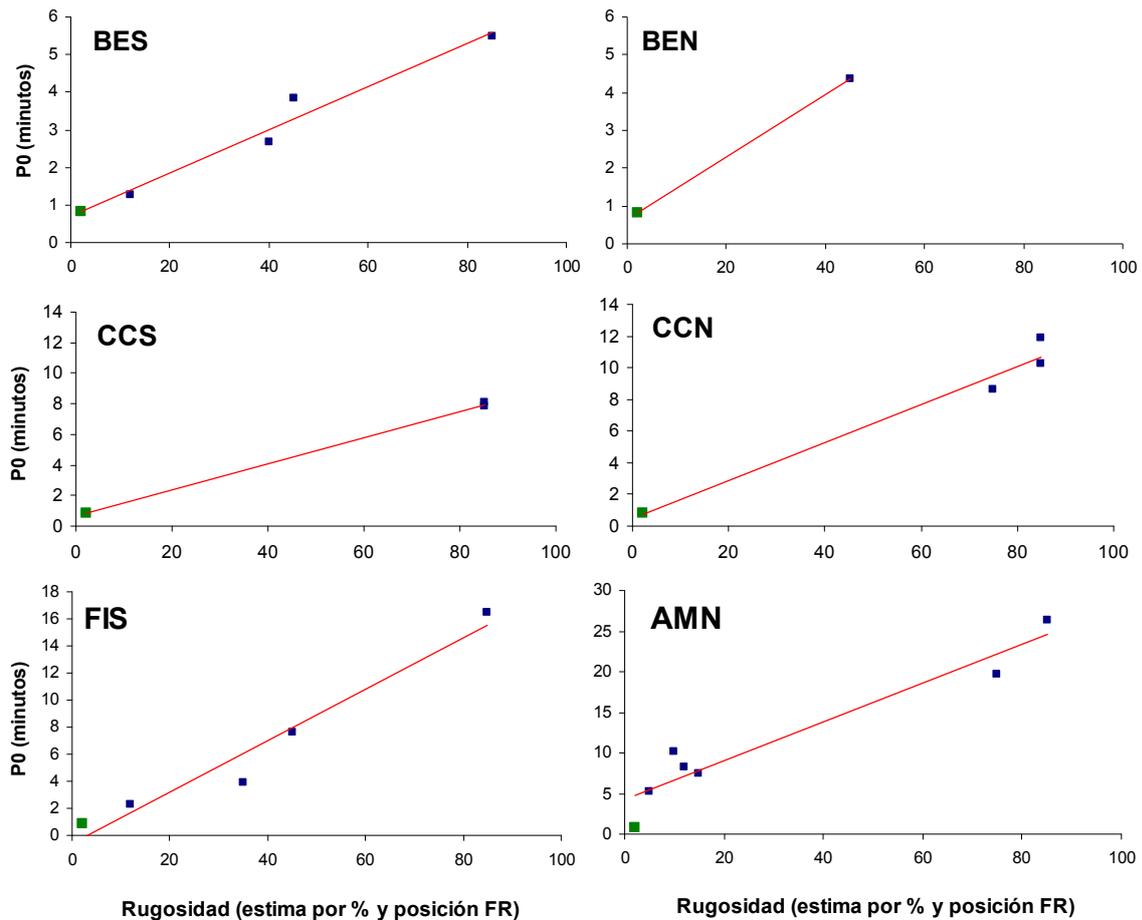


Figura 5.18 Modelos de ajuste para rugosidad superficial frente a tiempos de inicio a la escorrentía (parámetro P0) en general y para cada sitio. Rugosidad estimada a partir del % de cobertura y posición de fragmentos rocosos (FR). El círculo hueco corresponde a la parcela AM10 de ROCA que se utiliza en todos los sitios como extremo de respuesta.

Existe una correlación significativa a nivel general, si bien es cierto que en buena parte de los casos la distribución de puntos se concentra en los dos extremos del rango de rugosidades, lo que fuerza a unas relaciones casi perfectas, caso de CCS, CCN y AMN (Figura 5.18). Sin embargo en el resto de sitios, donde sí existen valores intermedios de rugosidades, el ajuste lineal es igualmente manifiesto.

Velocidad de estabilización (α): dinamicidad de la superficie al sellado

La Figura 5.19 muestra el gradiente resultante respecto de la *dinamicidad* de la superficie al sellado y el correspondiente comportamiento del parámetro α . Este gradiente se ha establecido a partir del % de cobertura de suelo desnudo expuesto a los impactos de las gotas de lluvia y considerando más susceptible a la dinámica del sellado el contacto con FR parcialmente embebidos que los situados sobre la superficie. El comportamiento de α en las parcelas de BES y FI es congruente con el gradiente propuesto, esto es, con el incremento de la velocidad de estabilización de la escorrentía a medida que se reduce la superficie de suelo susceptible al encostramiento por desagregación de partículas por efecto del impacto de las gotas de lluvia (sellado dinámico). Esta reducción de suelo desnudo lleva implícita el aumento de FR, sellado estático, en cuyo extremo se encuentra la ROCA.

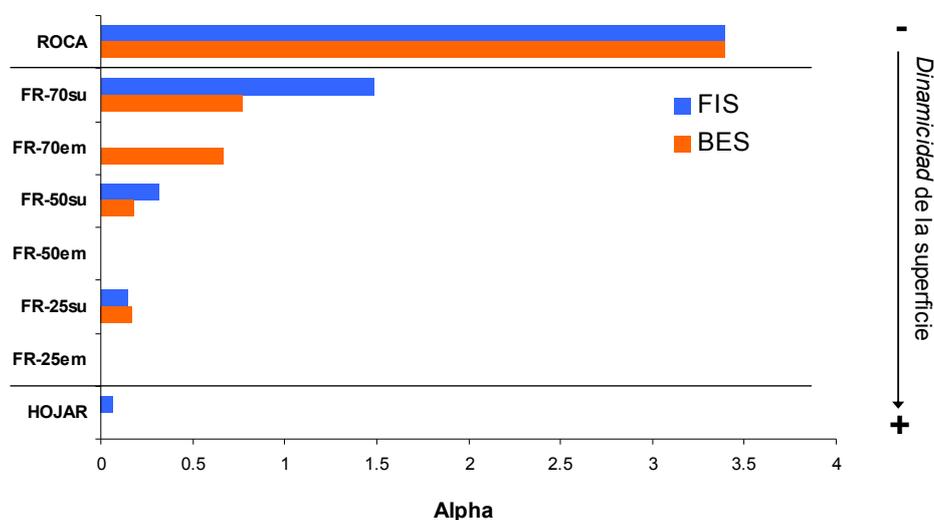


Figura 5.19 Secuenciación de CSS en base a la respuesta del parámetro alpha (α) de las parcelas de Finestrat (FIS) y Benidorm sur (BES). Gradiente que responde a la propiedad de *dinamicidad* de la superficie del suelo.

Al convertir la secuencia de CSS del gradiente en una escala semi-cuantitativa y haciendo uso de las parcelas de todas las áreas (Figura 5.20-general), se obtiene un ajuste exponencial con el parámetro α . Una vez identificada la forma de ajuste exponencial con todos los datos, y dada la relativa dispersión que se observa en la clase FR70su (valor 2 en la escala de *dinamicidad*), se considera oportuno establecer un modelo de ajuste para cada área de estudio (Figura 5.20). De esta forma se pretende recoger con mayor precisión las particularidades locales de infiltrabilidad debidas a condicionantes subsuperficiales, las cuales trascienden el efecto CSS, pues la *dinamicidad* de la superficie es tan sólo un factor de modulación de la respuesta.

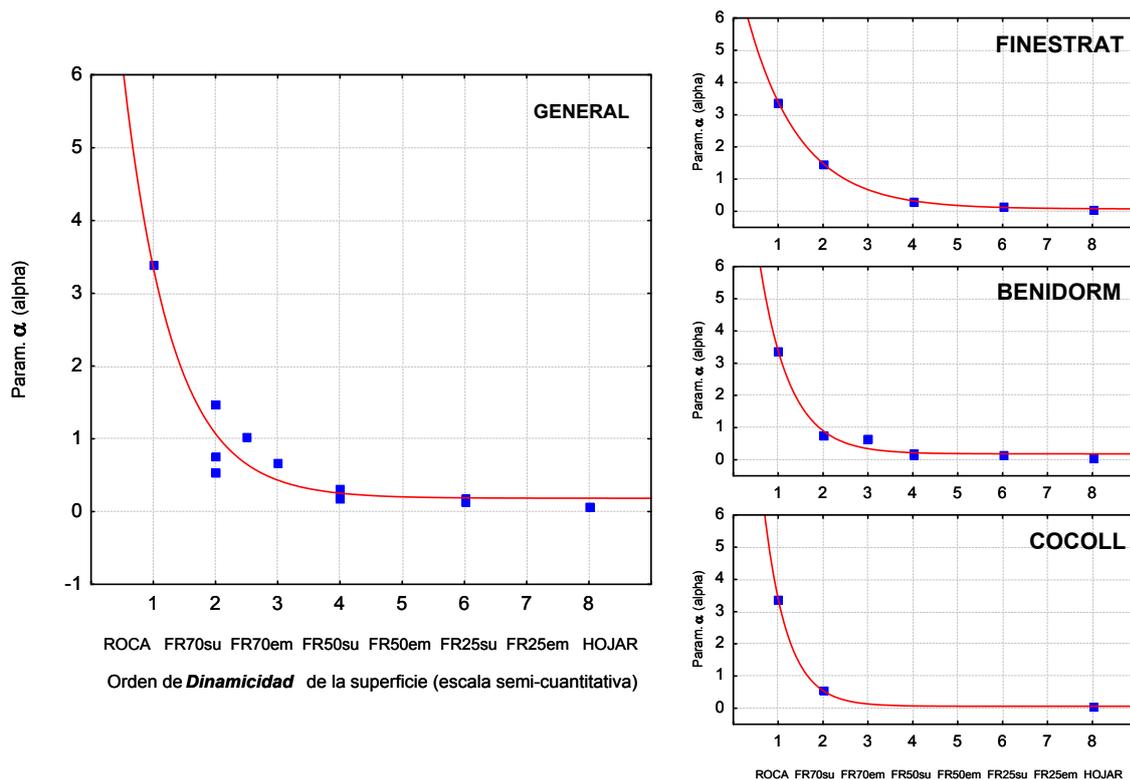


Figura 5.20 Modelos de ajuste general y por sitio para la *dinamicidad* de la superficie frente a la velocidad de estabilización de la escorrentía (parámetro α). La variable dinamicidad se presenta en una escala semi-cuantitativa en base al orden de la secuenciación de los CSS.

Tasa de infiltración final estable o capacidad de infiltración (Fc): protección del suelo y sellado efectivo

En el caso de F_c , el gradiente de CSS se establece de acuerdo a dos propiedades superficiales: (i) el grado de sellado superficial que denominamos *efectivo*, que corresponde con la superficie total que resulta más ineficiente a la infiltración (i.e. fragmentos rocosos *per se* y estadios avanzados de sellado por desagregación) y (ii) el grado de protección del suelo a los impactos de las gotas de lluvia. El primero es inversamente proporcional al área susceptible de producir infiltración (i.e. fracción de suelo desnudo previo al sellado superficial) y el segundo afecta a la propia eficiencia en el proceso de infiltración. En este sentido, el suelo adyacente a los fragmentos de roca en superficie es la zona más propicia para la infiltración, pues el hecho de no estar expuesta al impacto de las gotas de lluvia, por un lado evita el progresivo sellado superficial a medida que avanza el evento de precipitación, y por otro, permite la progresiva mejora de las condiciones de agregación del suelo subyacente, y por tanto de mayores capacidades de infiltración.

El gradiente de CSS resultante (Figura 5.21) muestra dos subgradientes anidados: (i) el sector de los FR embebidos en el que el % de cobertura es inverso a la capacidad de infiltración (F_c), donde sólo interviene el primer criterio mencionado de grado de *sellado efectivo*. (ii) El sector de los FR en superficie, en el que mejora la capacidad de infiltración a medida que incrementa la pedregosidad,

donde se aúnan los dos criterios citados anteriormente, i.e. la progresiva disminución del *sellado efectivo* potenciado por la mejora del suelo por la protección al impacto de las gotas de lluvia. Este gradiente de CSS es análogo al modelo propuesto por Poesen (1990).

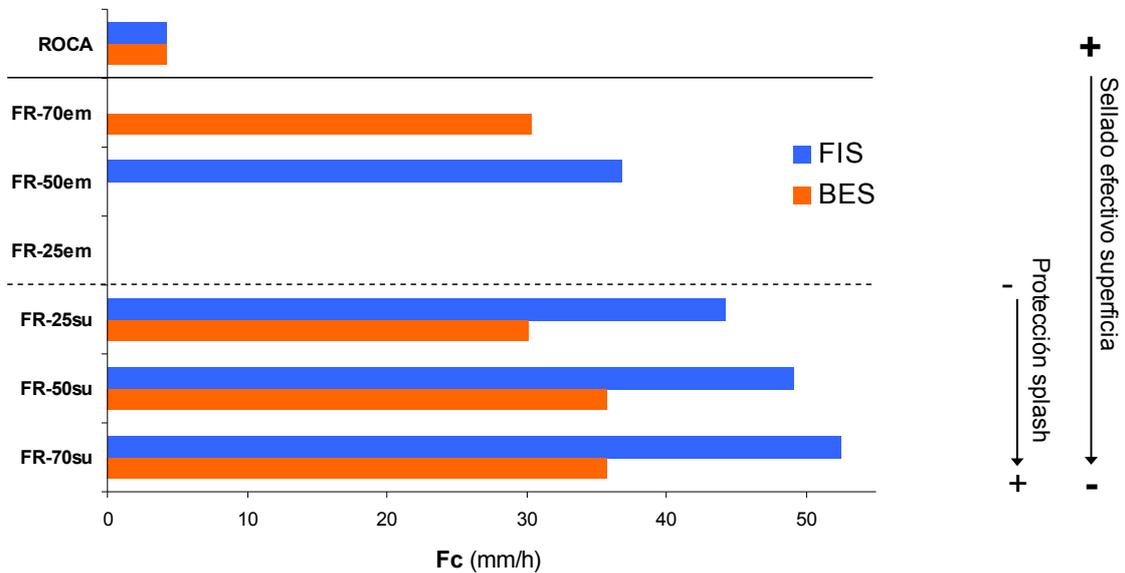


Figura 5.21 Secuenciación de CSS en base a la respuesta del parámetro Fc de las parcelas de Finestrat (FIS) y Benidorm sur (BES). Gradiente que responde a las propiedades de *sellado efectivo* y al grado de protección a los impactos de las gotas de lluvia (*splash*) de la superficie del suelo.

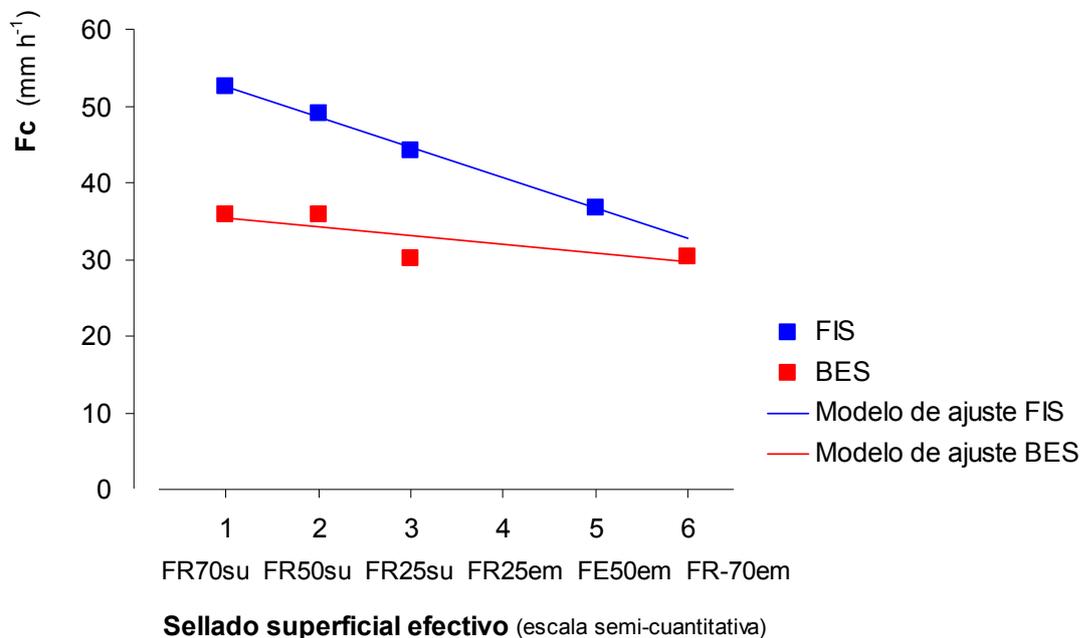


Figura 5.22 Modelos de ajuste para *sellado efectivo* de la superficie frente a la tasa de infiltración final estable (parámetro Fc). La variable *sellado efectivo* se presenta en una escala semi-cuantitativa en base al orden de la secuenciación de los CSS.

En la Figura 5.22 se muestran las funciones de ajuste entre el parámetro Fc y el gradiente de CSS que corresponde con el grado de sellado efectivo de la superficie, en el que se observa un excelente nivel de ajuste para FIS pero que sin embargo empeora para el caso de BES. En BES si bien existe contraste en la respuesta entre FR50su y FR25su de magnitud muy similar a FIS, no se evidencia como era de esperar entre los otros dos CSS de los dos extremos del gradiente, FR70su y FR70em. Las causas de este aparente desajuste de comportamientos entre ambos sitios se abordan posteriormente en el apartado siguiente (c) que contrasta los resultados con el modelo de respuesta de Poesen (1990).

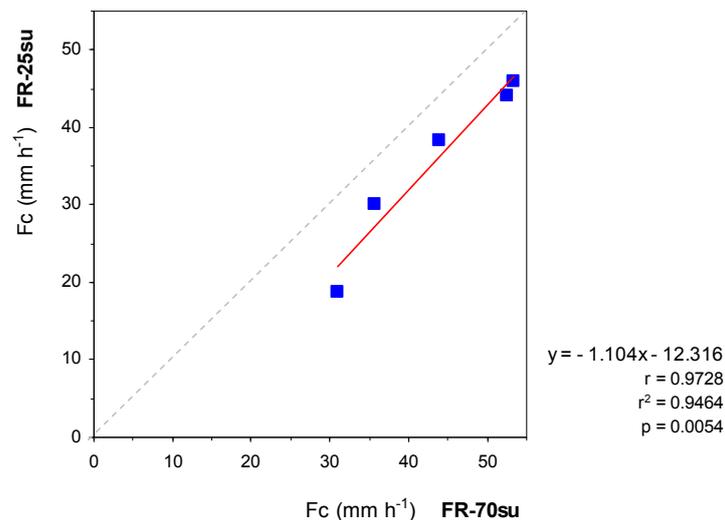


Figura 5.23 Congruencia del efecto CSS de incremento de la pedregosidad a través de las diferentes áreas. Confrontación de la respuesta en la Fc entre los dos extremos de cobertura de FR en superficie, las clases FR70su y FR25su, para todos los sitios con disponibilidad de simulaciones en ambas categorías de CSS.

En la Figura 5.23 se confronta la respuesta en la Fc de las clases FR-70su y FR-25su para todas las áreas de las que se tiene disponibilidad de ambas clases de superficie. Se hace uso de estos dos CSS por su mayor disponibilidad de datos de simulación y por su relevancia en las respectivas cartografías. Recordamos además, que BEN y CCS carecen de simulación de lluvia de la clase FR25su, por lo que es fundamental definir su relación con otros CSS para la posterior fase de asignación. Se observa una muy buena relación lineal (Figura 5.23) en la variación entre sitios de respuesta de ambos CSS. Esto significa que el efecto de CSS por el cambio de cobertura de FR se mantiene siempre proporcional independientemente de los valores de Fc *basales* debidos al carácter LOCAL del sitio. Esta es una evidencia de la posibilidad de aislar el efecto LOCAL del producido por los CSS.

c. Ajuste al modelo conceptual de respuesta de FR de Poesen, 1990: % cobertura y posición de FR

Los datos de las simulaciones de BES y FIS, de donde se dispone de mayor variedad de experimentos, se confrontan con el modelo de respuesta a la escorrentía propuesto por Poesen (1990) (Figura 5.24). En este modelo se considera el coeficiente de escorrentía total, que es una resultante del comportamiento del hidrograma, y por tanto, de los tres parámetros hasta ahora utilizados.

Propone a partir de datos empíricos tres trayectorias en función de la posición de los FR (embebida o en superficie) y de la tendencia o no al sellado superficial del material fino (ver Figura 5.24). Los dos casos que nos interesan (i.e. posición embebida y en superficie sobre material susceptible al sellado durante el evento de precipitación) muestran trayectorias divergentes a medida que se incrementa la pedregosidad. En el caso de los FR en posición embebida, el aumento de cobertura produce un incremento en los coeficientes de escorrentía totales, caso contrario de lo que ocurre con los FR sobre la superficie.

En la Figura 5.24 se integran los resultados de las simulaciones de BES y FIS, cada sitio en un orden de magnitud diferente, de modo que la comparación entre sitios y el modelo se efectúa en relativo. Los datos de FI son los que se encajan perfectamente con las trayectorias de respuesta del modelo. Esto es, el progresivo aumento de la pedregosidad en superficie produce un decaimiento también gradual e incluso proporcional al propuesto por el modelo. Además la única simulación disponible para FIS con pedregosidad embebida, FR50em, se posiciona a su vez muy cercana a la trayectoria correspondiente.

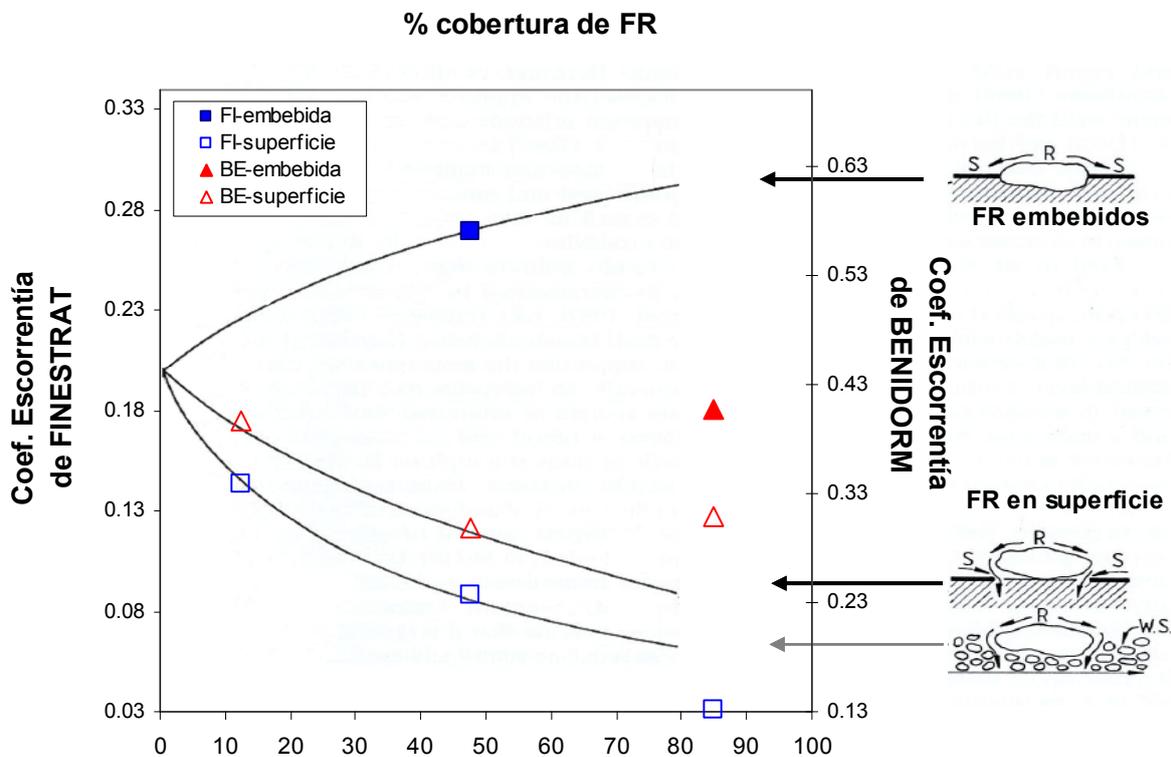


Figura 5.24 Ajuste de los datos de simulación de BES y FIS al modelo de respuesta en función del grado de cobertura y posición de los fragmentos rocosos (RF) propuesto por Poesen (1990).

El caso de BES presenta sin embargo alguna objeción al propio ajuste de los datos disponibles al modelo, que merece la pena ser discutida. Por un lado la clase FR70em presenta casi el mismo coeficiente de escorrentía que la FR25su, sin que se haya producido el esperado incremento. Por otro lado las clases FR50su y FR70su presentan igualmente respuestas muy similares, con una escorrentía de FR70su ligeramente superior a FR50su, de signo contrario a lo esperable. En balance,

las clases que podemos considerar con un comportamiento anómalo son la FR70em y la FR70su respecto a lo que el modelo predice (Figura 5.24).

El casi nulo efecto del incremento de la pedregosidad embebida en la respuesta respecto de la situación de FR25su se interpreta como resultado de una fracción fina con una marcada susceptibilidad al sellado superficial (Boix-Fayos, 2000), en el que no se aprecian apenas diferencias entre el sellado dinámico y el estático (este último ejercido por los FR embebidos) respecto de las tasas globales de escorrentía. Sin embargo, el incremento de la pedregosidad en superficie sí consigue mejorar las condiciones de infiltrabilidad del suelo (Figura 5.24) por efecto protector del suelo adyacente a los FR.

En el intento de justificar la anomalía en la respuesta de la clase FR70su respecto al modelo, se dirige la atención hacia las propias características de cobertura de la parcela de simulación. Esta parcela presenta una acumulación tal de FR que puede decirse supera el 100% de cobertura de FR, en que cabe esperar cierta superposición de FR en los que algunos pueden quedar semienterrados en posición embebida, y por tanto, esta parcela presentaría cierto grado de sellado efectivo reduciéndose así la infiltración. Esto explicaría la aparente neutralidad en la respuesta respecto de la clase FR50su a pesar del incremento de FR que debería mejorar la infiltración.

d. Síntesis del efecto de CSS en la respuesta para superficies no-vegetadas

La Figura 5.25 recopila los resultados fundamentales del análisis del efecto de los CSS no-vegetados en la respuesta. Desglosada ésta en los tres parámetros de Horton (P_0 , α y F_c), se especifica para cada uno de ellos la principal propiedad superficial que condiciona su dinámica, así como su respectivo gradiente de cambio en todo el rango de CSS considerados, el cual, además, lleva asociado el gradiente de respuesta del parámetro correspondiente. Esto se acompaña de una representación esquemática de los diferentes CSS en los que se indican los subprocesos que operan en cada caso.

Para una mejor interpretación visual se sustraen las diferentes secuenciaciones de CSS para cada parámetro en forma de diagrama de barras, en las que se identifica en cada caso una ordenación singular de CSS respecto de la posición y cobertura de los FR. Finalmente se acompaña de los modelos de ajuste *propiedad superficial vs. parámetro de Horton* que sustentan dichos resultados. Estas secuenciaciones de CSS según un determinado aspecto de la respuesta deben estar bien justificadas dada la relevancia fundamental de éstas en la fase posterior de asignación de la respuesta.

En el caso del tiempo de inicio de la escorrentía (P_0), la rugosidad es la propiedad superficial que gobierna la respuesta a nivel de CSS. La posición embebida de los FR da como resultado menores niveles de rugosidad frente a la posición en superficie. Esto es especialmente significativo una vez rebasado el umbral de cobertura de las clases FR25 (i.e. cuando la pedregosidad comienza a ser relevante), a partir del cual la posición en superficie siempre rebasa en rugosidad a la embebida, perdiendo así la alternancia observada en las clases FR25.

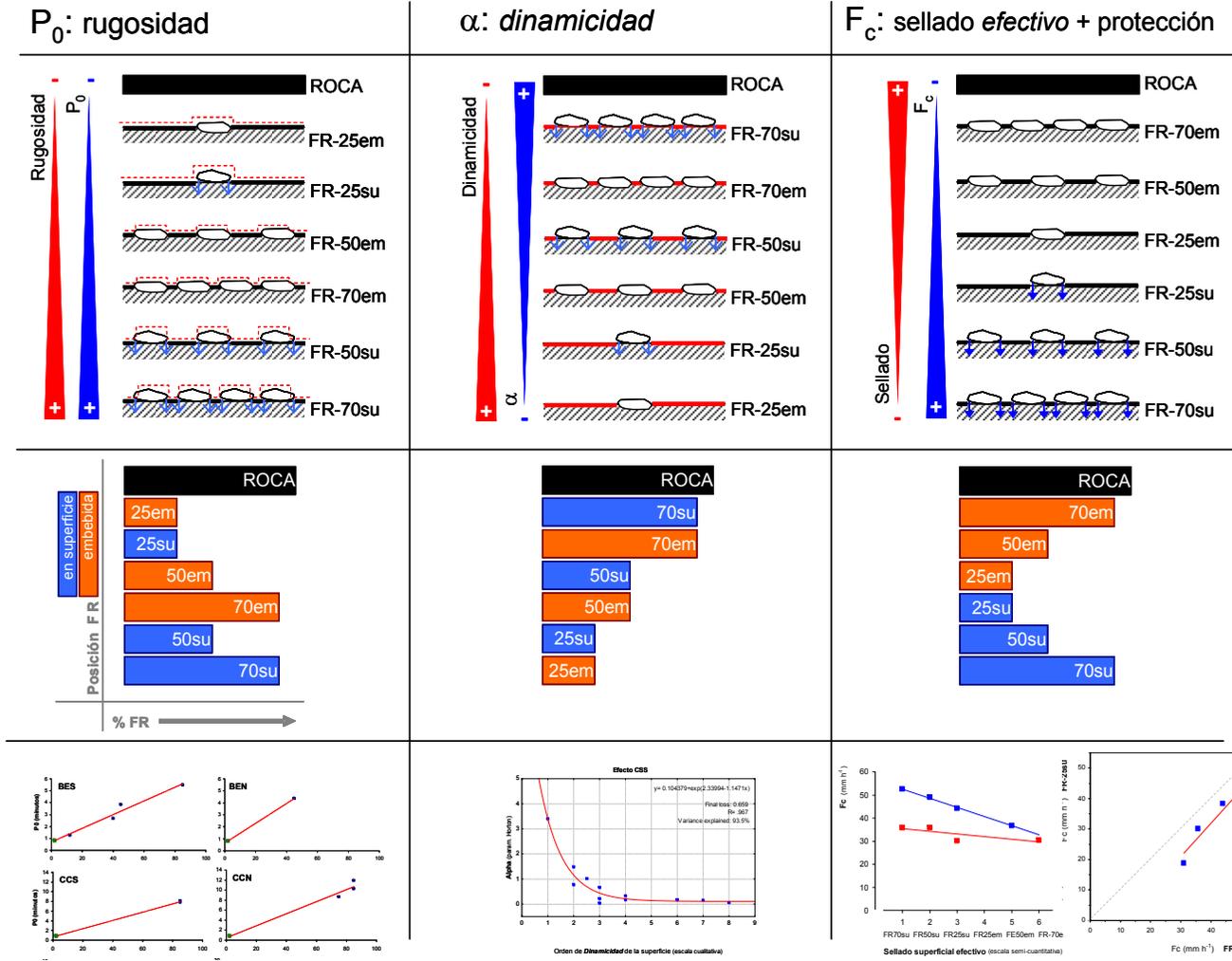


Figura 5.25 Síntesis de los resultados fundamentales del análisis del efecto de los CSS no-vegetados en la respuesta. Se presentan los gradientes de respuesta de los parámetros de Horton (P_0 , α y F_c) y la secuenciación de CSS a la que se les asocia una propiedad superficial clave correspondiente (esquemática en los dibujos). Se incluyen las relaciones obtenidas de confrontar la respuesta (parámetros de Horton) con la propiedad superficial.

Respecto de la velocidad en alcanzarse la estabilización de la respuesta (α) la propiedad superficial determinante que se ha identificado es la *dinamicidad* de la superficie durante el evento de precipitación, la cual es inversamente proporcional al % de cobertura de FR, al ejercer éstos de elementos de sellado estático de la superficie. En un segundo plano opera la posición de los FR, del modo que los embebidos confieren una mayor *dinamicidad* a la respuesta, pues a diferencia de los FR en superficie, todo su perímetro de suelo adyacente está expuesto al impacto de las gotas de lluvia, y por tanto de producir su sellado.

La tasa de infiltración final estable (Fc), parámetro asimilable a la capacidad de infiltración del suelo, se ha relacionado en primer lugar con el *sellado efectivo* del suelo que determina la superficie de infiltrabilidad, y en segundo lugar el grado de protección de la superficie a los impactos de las gotas de lluvia que repercute en la eficiencia de la infiltración. En la secuenciación de CSS, la máxima manifestación del *sellado efectivo*, a parte de la ROCA, son las superficies con elevada pedregosidad embebida para ir reduciéndose a medida que la pedregosidad en superficie se incrementa.

En síntesis (Tabla 5.4), el *sellado dinámico* hace referencia al que se produce de manera gradual en la fracción de suelo desnudo a medida que avanza el evento de precipitación modificando progresivamente las condiciones de infiltrabilidad de la superficie mediante el sellado por disgregación de partículas por efecto del impacto de las gotas. Remarcar el hecho que la intensidad del sellado superficial por esta vía es dependiente de las propiedades edáficas de cada sitio, pudiendo llegar a anularse en situaciones de suelo desnudo bien estructurado.

Tabla 5.4 Correspondencia de los diferentes atributos del sellado superficial con tipologías de superficie: posición de fragmentos rocosos (FR) y susceptibilidad del suelo desnudo al desarrollo de costra superficial. Se indica en rojo el parámetro de Horton que se ve influenciado según el atributo del sellado.

		param. Fc	
		sellado EFECTIVO	sellado NO-EFECTIVO
param. Alpha	sellado ESTÁTICO	FR embebidos	FR en superficie
	sellado DINÁMICO	Suelo desnudo con encostramiento	Suelo desnudo bien estructurado

En contraposición consideramos el *sellado estático*, que se refiere al ejercido por los propios fragmentos rocosos, que son elementos de nula infiltración en la estricta fracción de cobertura del suelo que ocupan, si bien la posición relativa respecto de la superficie de la pedregosidad es un atributo capaz de amortiguar, incluso invertir, este primer efecto directo de sellado (sellado no-efectivo). Este es el caso de la pedregosidad sobre la superficie, cuya posición propicia un perímetro subyacente (donde el FR no contacta con el suelo), el cual recibe el agua de escorrentía del propio FR a la vez que queda protegido del impacto de las gotas de lluvia y por tanto es un espacio optimizado para la infiltración..

5.2.3.2. *Materia seca: Hojarasca y plantas muertas*

La tipología y características predominantes del material vegetal seco varían según la ladera de estudio. Benidorm norte (BEN) es la única ladera en la que se ha diferenciado una clase de acumulación de hojarasca propiamente, en el sentido de material vegetal residual que se mantiene junto a la planta viva (esparto en este caso). En las otras áreas, BES y CCS, esta fracción de acumulación de hojarasca no tenía la suficiente entidad como para ser considerada una clase particular, si bien como es evidente, la presencia de hojarasca está presente en las tres laderas.

Benidorm sur (BES) tiene la particularidad de presentar un salpicado de plantas anuales secas, que aunque de pequeño tamaño, en conjunto tienen la entidad suficiente para ser considerada una clase particular de la cartografía. En Cocoll (CCS), sin embargo, la particularidad radica en la presencia de individuos completos de arbusto *Ulex parviflorus* muertos con un importante significado en los procesos a escala de ladera.

Se asume que las distintas modalidades de material seco llevan asociadas respuestas a la escorrentía también diferentes en función de sus particularidades morfológicas y grado de descomposición. Sin embargo la carencia de simulaciones de lluvia de esta categoría genérica de componente superficial en las respectivas zonas de estudio obliga a analizar el comportamiento de estas superficies en base a características intrínsecas observadas y a resultados empíricos en la bibliografía disponible.

Los factores fundamentales que aquí se han considerado para el examen de la respuesta hidrológica son: (i) la altura y estructura de capa aérea de material susceptible de interceptar la lluvia incidente (capa de amortiguación y reparto de flujo cortical y de transcolación); (ii) la potencial presencia de flujos preferenciales de penetración del agua en el suelo, en este caso como consecuencia de la existencia de macroporos, fundamentalmente debido al desarrollo en profundidad del sistema radicular de la planta y (iii) por último, de las características de la biomasa, en el sentido de presencia de sustancias que propicien hidrofobia en el suelo, como son esencias aromáticas y ceras fundamentalmente.

En la Figura 5.26 se sintetizan las particularidades de cada situación en función de los factores anteriormente citados. En BES las anuales secas, a efectos de respuesta a la escorrentía, se les atribuye un comportamiento similar a la vegetación viva de ese mismo porte, pues mantienen una misma fisonomía aérea y sistema radicular a pesar de estar secas. Debido a la escasa entidad y distribución salpicada de este tipo de vegetación, el resultado de la progresiva desmantelación (viento y impacto de la lluvia) y descomposición (raíces fundamentalmente) del material con el tiempo, no constituye un cambio significativo en la superficie del suelo suficiente como para considerar su dinámica temporal. El dato de simulación de lluvia que avala esta analogía de respuestas es la parcela AM03 que corresponde con una *Stipa* muerta, la cual muestra una respuesta idéntica (escorrentía nula) a la parcela de un individuo vivo, pues presentan ambas unas estructuras aéreas y radicales todavía equiparables.

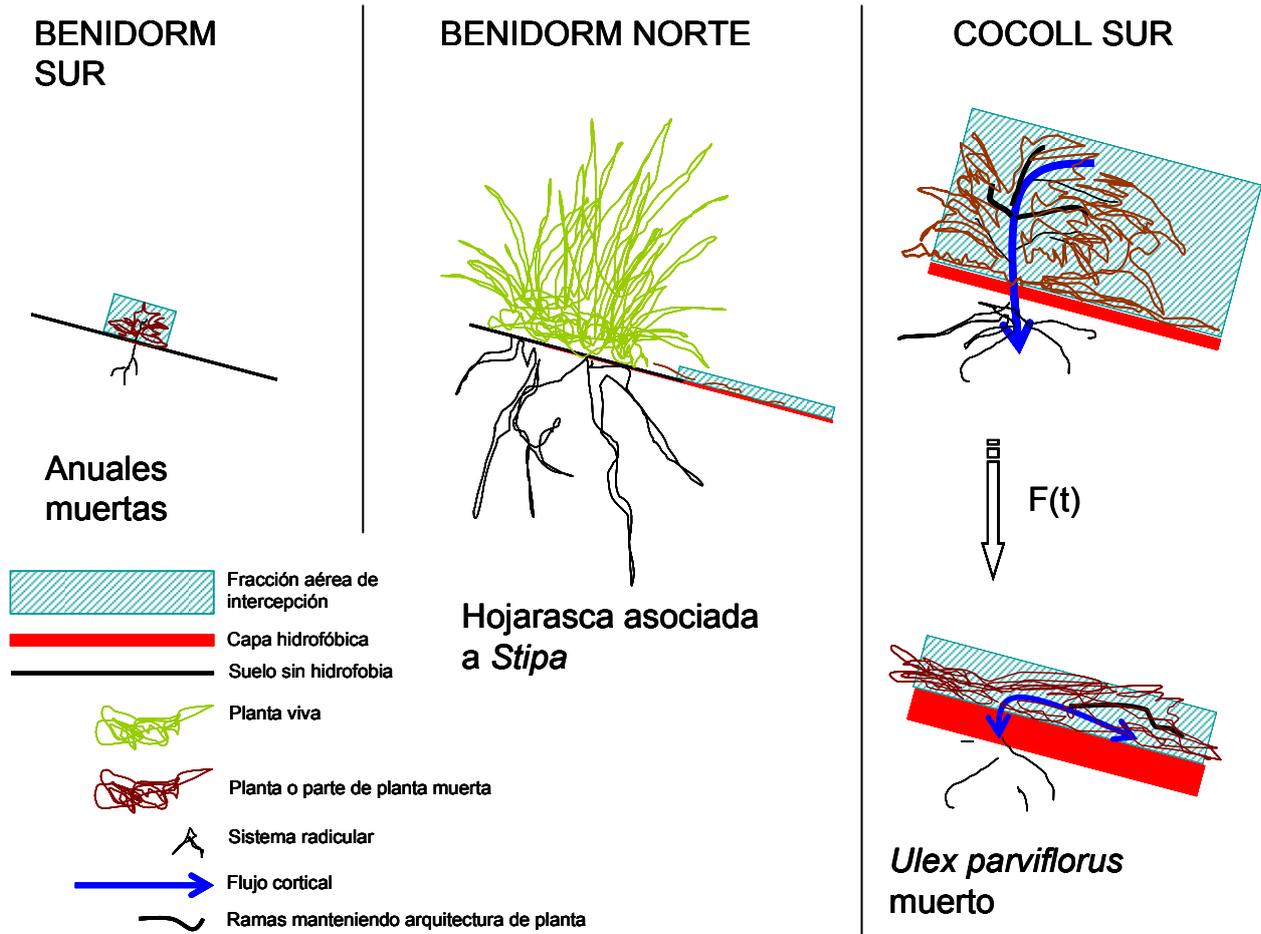


Figura 5.26 Esquema de presencia predominante del tipo de residuo/material vegetal muerto por área de estudio y descripción de sus principales características en relación con el comportamiento hidrofóbico de los suelos.

En BEN, el desprendimiento de hojas de *esparto* se produce de forma muy gradual, lo que unido a las altas tasas de descomposición de materia orgánica que se presumen en estos ambientes, limita la acumulación de hojarasca. De este aspecto se deriva que la posible acumulación de sustancias repelentes al agua en la superficie del suelo sea muy baja (lixiviado progresivo), si bien es posible que presente algún grado, aunque leve, de hidrofobia. La parcela de simulación de Finestrat FI10, con hojarasca de *esparto* sobre una cobertura de suelo desnudo (FR25su) presenta un adelanto significativo del inicio de la escorrentía en relación a la parcela homóloga de FR25su (FI01) pero sin presencia de hojarasca, además de un considerable incremento de la tasa de escorrentía y una estabilización más gradual (Figura 5.27). Esta modificación de la respuesta por parte de la hojarasca se atribuye al fenómeno de la hidrofobia.

En CCS, en el proceso de senescencia y muerte de los individuos de aliagas (*Ulex parviflorus*) se pueden establecer diferentes estadios graduales en la dinámica de descomposición de la planta en los que se atribuye un progresivo aumento de la hidrofobia de la superficie del suelo y de las tasas de escorrentía en general, esto último corroborado a partir de la respuesta obtenida en la parcela

gerlach CC04 en condiciones de lluvia natural. Como muestra la Figura 5.26, la arquitectura de la planta en estado vivo, y mantenido al menos en los primeros estadios tras la muerte, promueve un flujo cortical preferente en la parte aérea, que cuando llega a la superficie del suelo se convierte asimismo en un flujo preferente de penetración en el suelo por el sistema radicular (por macroporosidad). Este aspecto queda evidenciado en los experimentos de interceptación realizados por Belmonte-Serrato y Romero-Díaz (2013) en varios arbustos y en pino, en los que el romero (en este estudio, tipo de matorral más semejante a la aliaga) presenta una predominancia del flujo cortical (40%) con respecto a la fracción de trascolación (30%). En estos estadios en los que la planta todavía mantiene una posición erguida, la parte aérea de la planta todavía desempeña la función de redirección del flujo hacia el suelo favoreciendo su penetración en el suelo, si bien, la aceleración de la caída de hojas secas al suelo puede favorecer la acumulación gradual de sustancias hidrofóbicas en las capas superficiales. De este modo, en este estadio inicial, el incremento de la escorrentía se debe a las dificultades de infiltración del agua proveniente del flujo de trascolación.

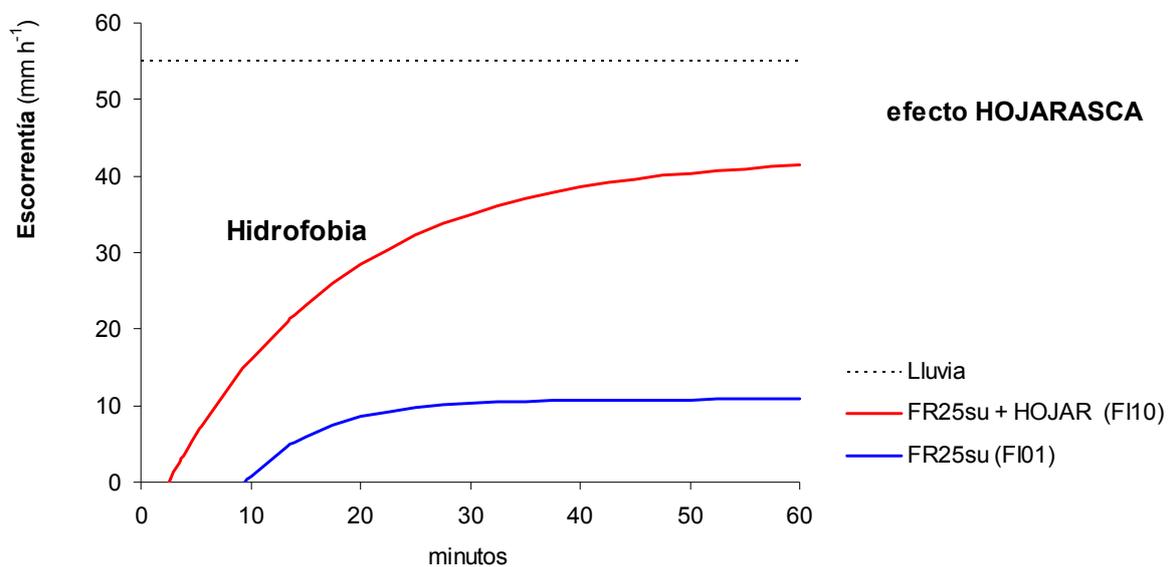


Figura 5.27 Curvas de escorrentía para mostrar el fenómeno de la hidrofobia por presencia de hojarasca (HOJAR) en parcelas de simulación de lluvia del área auxiliar de Finestrat.

Sin embargo, a medida que el porte de la planta decae y el sistema radicular comienza a descomponerse (i.e. progresiva desconexión de la macroporosidad del suelo), la arquitectura funcional de redirección del flujo de agua hacia el interior del suelo queda obsoleta pasando a un estadio en el que la escorrentía superficial se ve favorecida por dos circunstancias: (i) la caída de la planta y todavía presente el esqueleto branquial principal, favorece un flujo cortical paralelo a la superficie del suelo (Figura 5.26) y (ii) la intensificación de la hidrofobia de la capa superficial del suelo por el colapso de la práctica totalidad de la planta y por la reducción de las posibilidades de lavado del suelo (por descenso de la infiltración).

5.2.3.3. Superficies vegetadas: tipologías de respuesta

De la comparación de los hidrogramas disponibles de parcelas vegetadas se obtienen tres tipologías de comportamiento según P_0 y α , resumidos en la Tabla 5.5 y representados en la Figura 5.28:

- **Grupo V1:** En el que el comienzo de la escorrentía se produce más rápidamente en relación con el resto, con una rápida estabilización de la curva. Las parcelas que siguen este comportamiento son la parcela con esparto (BE01) y la mixta (vegetación y área desnuda) con menor cobertura vegetal (BE09).
- **Grupo V2:** Con una posición intermedia en los tiempos de escorrentía alcanzando bruscamente la estabilización. Las parcelas con este comportamiento se caracterizan por una vegetación de porte más bajo (BE03), incluso en contacto directo con el suelo (BE02 de *Brachypodium retusum* especialmente).
- **Grupo V3:** La respuesta más lenta a la escorrentía (valores más altos en P_0) y con una curva hacia la estabilización más tendida. Esto sucede en presencia de vegetación de porte más alto, como el caso de la BE10 con un romero que cubre toda la parcela y las parcelas BE04 y BE05 con presencia de matas de vegetación (arbustos) de altura media.

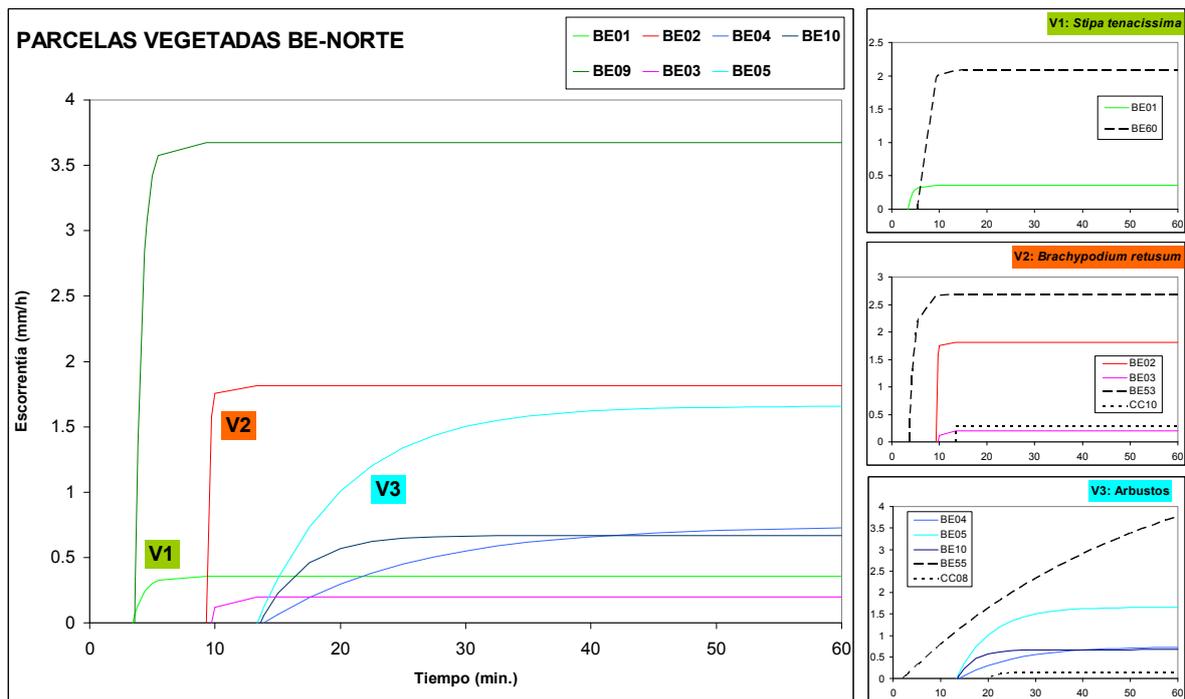


Figura 5.28 (a) Curvas de escorrentía (mm h^{-1}) de las parcelas vegetadas de la ladera Norte de Benidorm; (b) comparación de las curvas de escorrentía de BEN con las de CCS por subgrupos.

Tabla 5.4 Síntesis de resultados de la clasificación de las parcelas de vegetación en tres grupos funcionales (Grupo V_).

Grupo	Po	α	Tipología de respuesta (Po : α)	Parcela	Descripción	Factor determinante / Proceso
V1	Baja	Media	Respuesta más rápida con un incremento gradual hasta alcanzar Fc.	BE01	Stipa	Fisionomía que favorece el flujo rápido, independientemente de la altura. STEMFLOW (flujo cortical) muy rápido
				BE09	Mixta (< % de cobertura)	Efecto menor % de cobertura vegetal.
V2	Media	Alta	Respuesta intermedia alcanzando bruscamente la Fc.	BE03	Matas baja altura	Fisionomía y altura de planta . STEMFLOW (flujo cortical) rapidez intermedia
				BE02	Mixta (Brachypodium)	
V3	Alta	Baja	Respuesta más lenta con incremento muy gradual hacia la Fc.	BE04	Matas de altura media	Altura de planta . STEMFLOW (flujo cortical) tarda más en alcanzar la superficie
				BE05		
				BE10	Romero	

La agrupación de respuestas análogas realizada se apoya con el análisis cluster realizado con los datos derivados de las simulaciones de lluvia introduciendo como variables los tres parámetros de Horton (P_0 , α y Fc), el coeficiente de escorrentía y la tasa de escorrentía media obtenida a la salida de la parcela. Se añaden la parcela BE60 correspondiente a la parcela de esparto de la ladera BES; y las parcelas de CCN de herbáceas de *Brachypodium* (CC10) y la arbustiva con romero (CC08) (Figura 5.29).

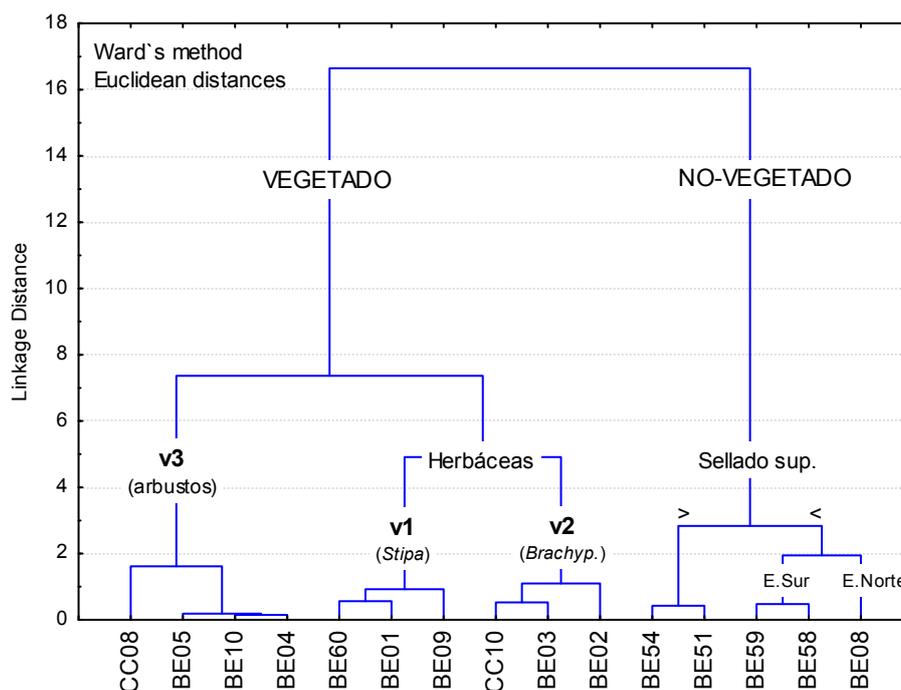


Figura 5.29 Análisis cluster (método Ward y distancia Euclidiana, con estandarización de las variables) para la discriminación de tipologías de respuesta a la escorrentía. Variables: Tasa de escorrentía media; coeficiente de escorrentía y parámetros de Horton (P_0 , α y Fc), Modificado de Arnau *et al.*, 2008.

La clasificación obtenida mediante el análisis cluster (Figura 5.29) muestra una completa correspondencia con la agrupación establecida anteriormente, discriminándose claramente las tres tipologías de respuesta de la vegetación. Además se sitúan más próximas las tipologías de herbáceas respecto de las especies arbustivas. En el apartado de áreas no-vegetadas, el sistema de clasificación

también consigue discriminar dos bloques de respuesta, los cuales identificamos con el grado de sellado efectivo de cada superficie. Destacar que el efecto del contraste de exposición de la ladera también se discrimina en el caso de las parcelas de BES.

A modo de conclusión, las variables que se han observado que influyen en mayor medida la dinámica de la escorrentía en las superficies vegetadas son junto con el porcentaje de cobertura, la altura (ambas reflejan la biomasa aérea de la planta) y fisionomía de la planta. Éstas últimas interviniendo en la velocidad del flujo de intercepción de la planta (*stemflow* o flujo cortical). El ejemplo más claro es el caso del esparto que por la propia fisionomía de las hojas, muy lisas y angulosas, favorece un flujo rápido teniendo como resultado los valores más bajos de P0. En las otras tipologías de planta la altura de las matas determina la rapidez con que el flujo de intercepción alcanza la superficie del suelo.

5.3. SISTEMA DE ASIGNACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE HORTON

La siguiente fase tiene como propósito otorgar a los componentes superficiales del suelo (CSS) un comportamiento hidrológico mediante la construcción la *curva de escorrentía o hidrograma tipo* para cada una de las clases presentes en la cartografía de cada ladera de estudio, para lo que se precisa una asignación individualizada de valores de los parámetros de Horton (α , P0 y Fc, de la Ecuación 5).

Tabla 5.6 Matriz de disponibilidad de simulaciones de lluvia (RFS) según los requisitos por sitio y CSS.

genérico / universal															
efecto LOCAL	CCS														
	BEN														
	BES														
CCS	ROCA	RF 70em	FR 50em	FR 25em	RF 70su	FR 50su	FR 25su	HOJAR	PLMTA herba.	PLMTA ulex	STIPA	HERBA	ARBUS	PINO	
tipo	NO-VEGETADO							MAT. SECA			VEGETADO				
		Disponibilidad de RFS													
		Carencia de RFS													
		Disponibilidad indirecta													

La carencia de datos empíricos de simulación de lluvia para algunas de las tipologías de superficie en las diferentes laderas (Tabla 5.6) plantea la necesidad de establecer diferentes protocolos de asignación de parámetros basados en los resultados del análisis de las simulaciones expuestos en los apartados anteriores. Estos resultados recogen tanto el efecto de los componentes superficiales (efecto CSS), como las variaciones de respuesta derivadas del cambio en la exposición de la ladera y/o área de estudio (efecto LOCAL). En la Tabla 5.6 se indican las clases con una consideración genérica o universal, que es cuando el fuerte efecto del CSS en la respuesta se sobre impone, anulando el efecto LOCAL. Al igual que en el proceso de análisis, el procedimiento de asignación de

estos valores difieren en función de la tipología genérica de superficie: vegetada, no vegetada y materia seca.

5.3.1. Superficies no vegetadas

Esta es la subcategoría en la que es fundamental la consideración LOCAL, puesto que el efecto de CSS se restringe a un papel modulador de la respuesta sin llegar a enmascarar el carácter intrínseco del sitio (Tabla 5.6) y, por ello, se adapta un modelo de asignación específico para cada área de estudio. Estos modelos corresponden con las funciones de ajuste *propiedad superficial vs. parámetro de Horton* obtenidas a partir de los datos de simulación disponibles para cada área de estudio en el Sistema de Análisis (Figura 5.30). Para la asignación se ha optado por utilizar para todo el rango de CSS los valores estimados a partir del modelo correspondiente prescindiendo de los valores empíricos *per se* (Figura 5.30), para así evitar incongruencias en los patrones de respuesta por la dispersión de los datos respecto de la líneas de ajuste. La Figura 5.30 recopila todos los modelos de ajuste para el cálculo de los tres parámetros de Horton, a excepción del parámetro Fc para la ladera de Cocoll cuya opción de interpolación para la clase FR25su se muestra en la Figura 5.31.

Señalar que para el parámetro α las dos laderas de Benidorm (BES y BEN) comparten el mismo modelo de asignación debido a que la ladera BEN carece de simulación de la clase FR70su que es la necesaria para reajustar el modelo genérico a cada área de estudio (ver apartado 5.2).

En el caso del parámetro Fc, para construir la recta de ajuste lineal de la ladera BEN con una única parcela de simulación de lluvia en el rango de superficies no-vegetadas, se ha establecido un modelo de asignación estimando una respuesta de trayectoria paralela pero de magnitud diferente a la obtenida en la ladera BES (Figura 5.30), esto es, una función de ajuste con la misma pendiente de la recta pero con un coeficiente de intersección calculado a partir de las diferencias de magnitud de Fc entre las parcelas homólogas de ambas laderas (FR50su). Este modelo de asignación adoptado está asumiendo que el contraste microclimático entre dos laderas que mantienen constantes los otros factores locales sólo modifica la magnitud de las capacidades de infiltración, manteniendo un factor de proporcionalidad en la respuesta a lo largo de todo el rango de superficies.

Sin embargo, la asignación del parámetro Fc para la ladera de Cocoll (CCS) se realiza de un modo diferente porque no existe posibilidad de establecer un modelo de ajuste para todo el rango de superficies como en los casos anteriores debido a que sólo una de las tipologías de superficie está cubierta con simulaciones de lluvia (FR70su). Aunque el requisito de asignación también es limitado, pues en esta ladera el rango de superficies cartografiadas con pedregosidad se restringe a los dos extremos de FR en superficie, FR25su y FR70su. El valor de Fc para FR70su se ha obtenido del promedio de las 3 parcelas de simulación disponibles en esta ladera. Para el caso de FR25su, el modelo de asignación adoptado ha sido la relación obtenida en el análisis entre FR70su vs. FR25su (Figura 5.31).

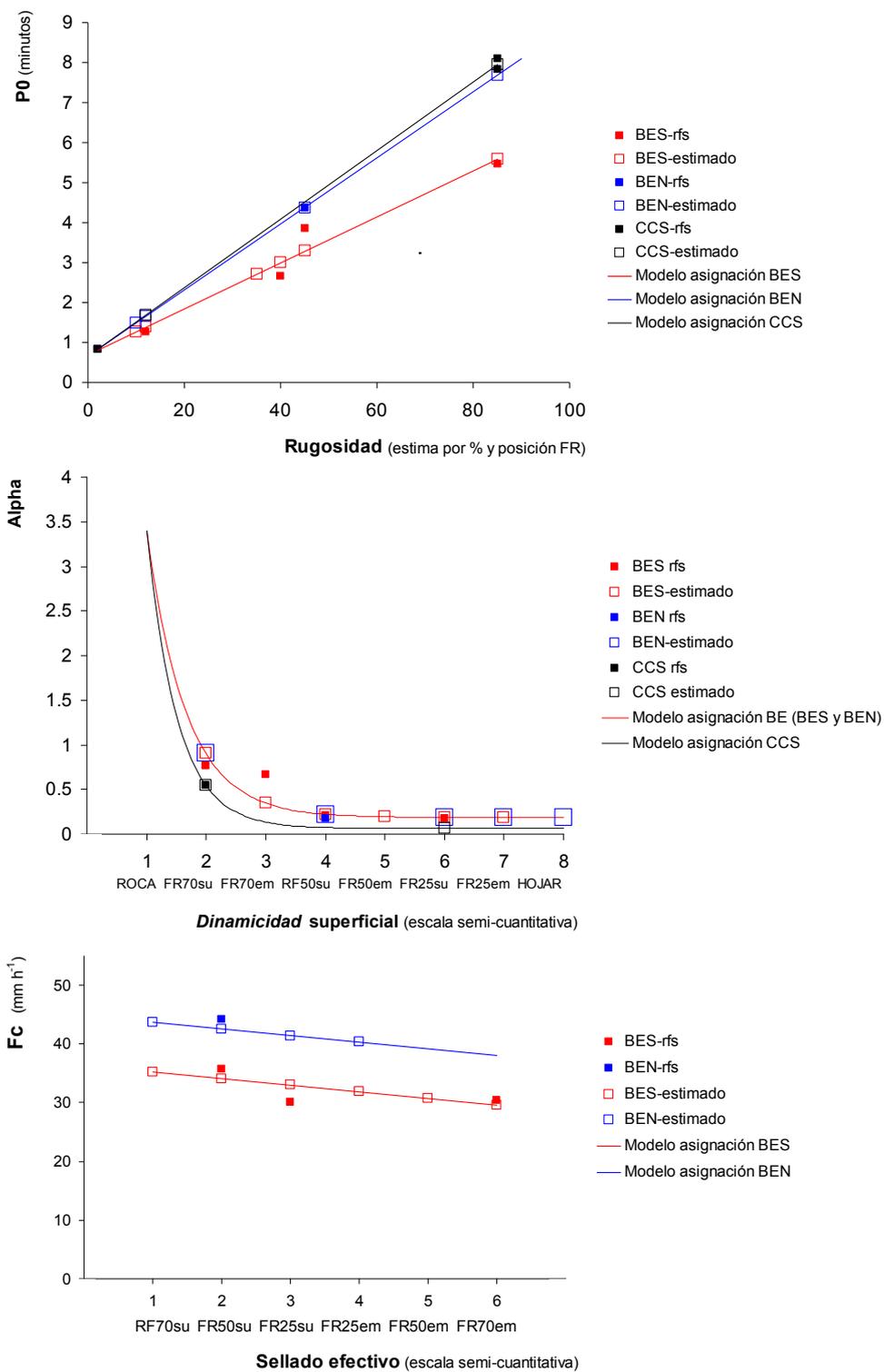


Figura 5.30 Cálculo de los valores de asignación de las superficies no-vegetadas para cada uno de los tres parámetros de Horton (P_0 , α y F_c) para las tres áreas de estudio en base a las relaciones derivadas del sistema de análisis.

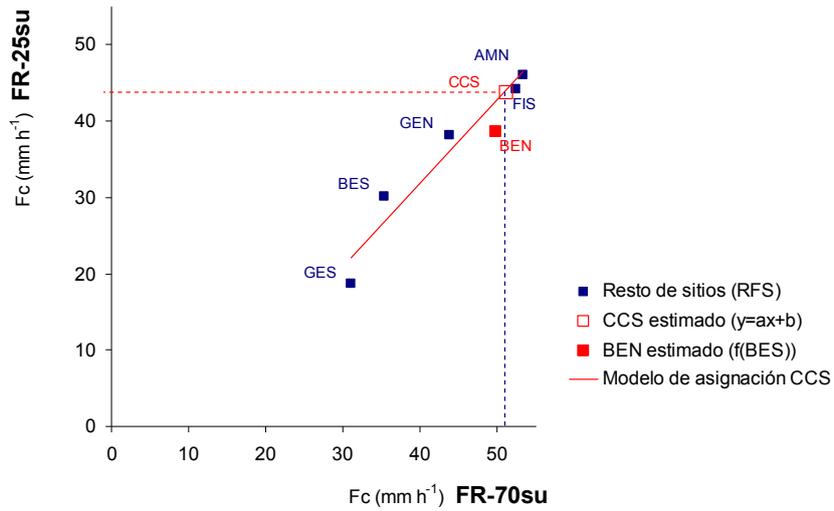


Figura 5.31 Cálculo del valor de asignación de la superficie FR25su del parámetro de Horton Fc para el área de estudio de Cocoll (CCS) en base a la relación derivada del sistema de análisis.

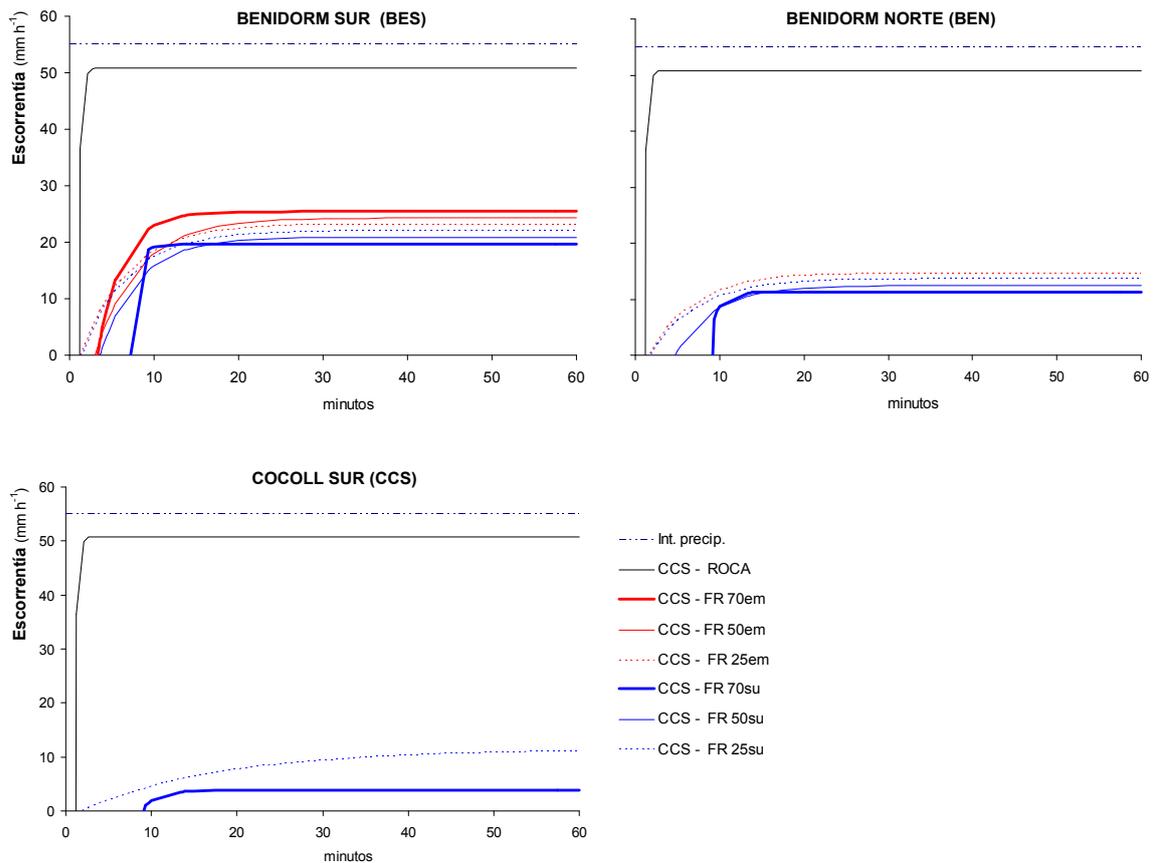


Figura 5.32 Hidrogramas tipo resultantes del Sistema de Asignación para la tipología de superficies no-vegetada para las tres laderas de estudio.

Por último, para el caso concreto de la clase de afloramientos rocosos (ROCA) se ha asignado directamente a todas las laderas de estudio los valores de la simulación disponible en Aguamarga (AM10, Figura 5.15), puesto que esta tipología de superficie tiene una consideración universal de la respuesta al asumir que carece de condicionamiento local.

En balance, en la Figura 5.32 se recopilan todos los *hidrogramas tipo* de la tipología de superficies no-vegetada resultantes de la asignación para las tres laderas de estudio, donde principalmente se destaca el fuerte contraste en término de magnitudes de escurrentía entre laderas. En BES donde se representa todo el rango de superficies se observa claramente el gradiente de respuesta según la posición y cobertura de los FR respecto de las capacidades de infiltración finales (Fc). Aunque previo a la estabilización existe un entramado de respuestas más complejo resultado de la combinación del comportamiento específico de las diferentes superficies respecto a P0 y alpha. Una propiedad importante del resultado de esta metodología de asignación es que la cuota de respuesta explicada por el efecto modulador de los CSS consigue quedar reflejada de manera congruente entre los diferentes sitios, pero a su vez estar adaptada al condicionante local del área de estudio. Así pues, el resultado son *hidrogramas tipo* que mantienen una especie de proporcionalidad en las relaciones entre CSS entre sitios.

5.3.2. Superficies vegetadas

Para la asignación de los hidrogramas tipo de escurrentía de la tipología de áreas vegetadas se ha utilizado la clasificación obtenida en el análisis de las simulaciones de lluvia que daba como resultado tres categorías de comportamiento (V1, V2 y V3) según la fisionomía y altura de planta, cuyo protocolo preciso de asignación se sintetiza en la Tabla 5.7. Para el caso del sustrato arbóreo (*Pinus halepensis*), dada la imposibilidad de realización de experimentos de simulación de lluvia, se ha optado por la asignación directa de la respuesta de los arbustos, esperando una mayor similitud con esta categoría de vegetación, si bien se es consciente de que se obvian los procesos característicos que ocurren bajo de la copa del sustrato arbóreo.

Tabla 5.7 Resumen de la metodología de asignación de valores de los parámetros para las superficies vegetadas.

Grupo	Tipología de planta	Clase CSS	Parcela RFS	Metodología
V1	Stipa tenacissima	STIPA	BE01	Asignación directa
V2	Brachypodium retusum	HERBA	BE02	BE03 Promedio
V3	Otras plantas: Predominio de la gama de alturas entre media-alta	ARBUS (+ PINO)	BE04 BE10	BE05 Promedio

La Figura 5.33 muestra *los hidrogramas tipo* resultantes, en los que se observa unos valores mínimos de escurrentía, especialmente en el caso del esparto, resultando más significativa la variación entre

clases de los tiempos de inicio de la escorrentía (P0), si bien en cualquier caso se puede asumir que estas superficies son sumideros netos de agua en condiciones de suelo seco.

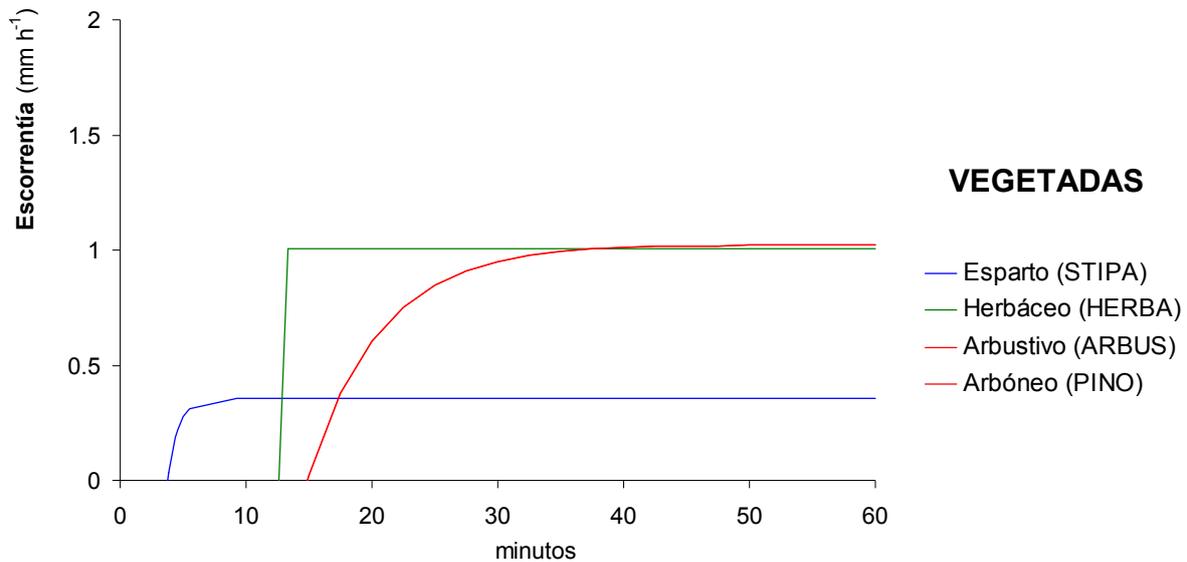


Figura 5.33 Hidrogramas tipo resultantes del Sistema de Asignación para la tipología de superficies vegetadas.

Se utilizan los mismos *hidrogramas tipo* para todas las laderas de estudio, a pesar de que en las simulaciones de CCS la escorrentía registrada fuese despreciable. Este criterio de asignación asume un carácter universal o general de la respuesta, lo que significa que el efecto CSS se sobre impone al carácter LOCAL enmascarando su influencia.

5.3.3. Materia seca: hojarasca y plantas muertas.

Partiendo de la especial heterogeneidad de situaciones en torno a la abundancia y significancia de las diferentes modalidades de material vegetal seco, tanto en forma de hojarasca esparcida en los alrededores de la planta en BEN, como en la forma de planta completa seca y muerta en BES y CCS (ver Figura 5.26), se requiere una metodología de asignación de comportamiento hidrológico adaptada a las peculiaridades de cada caso.

En el caso concreto de BES en el que predomina un residuo vegetal compuesto de pequeñas plantas salpicadas en los espacios desnudos, mayoritariamente anuales, (Figura 5.26) se le ha asignado la respuesta correspondiente a la tipología de vegetación de herbáceas genérica (HERBA, Tabla 5.7). Se asume que mientras la pequeña planta seca mantiene su morfología aérea intacta, su respuesta a la escorrentía es perfectamente asimilable a la del grupo V2 de Herbáceas y matas de baja altura (ver Tabla 5.5), ya que todos los procesos implicados en la partición y redistribución del agua por efecto de la planta, tales como la interceptación de la lluvia, los flujos corticales y de trascolación, la infiltración favorecida por el sistema radicular, no difieren significativamente respecto del estado vivo de la planta. Este hecho se corrobora con el dato empírico de la parcela de simulación AM03 que corresponde a un ejemplar de esparto muerto, que reproduce la respuesta de la simulación en el esparto vivo en la misma ladera.

En Benidorm norte, sin embargo, la tipología predominante de material vegetal seco es la hojarasca propiamente dicha, aquí caracterizada por una fina capa de acumulación de hojas de esparto en relativo estado de descomposición situada en los alrededores de ésta (Figura 5.26). La densidad de hojarasca en los lugares de acumulación en la ladera norte de Benidorm es sustancialmente mayor que en la ladera sur, debido a que las macollas de esparto en la norte son mayores y más próximas entre sí, lo cual propicia un solapamiento en la caída de hojas muertas al suelo y por tanto viéndose incrementada la densidad de hojarasca en determinados espacios, pudiéndose presuponer un efecto acumulativo en el tiempo que refuerza cambio de la respuesta de estas superficies frente a la lluvia, concretamente pudiendo aparecer ciertos signos de hidrofobia en la capa más superficial del suelo. Aunque, como evidencian experimentalmente Verheijen y Cammeraat (2007), es esparto no es una especie con elevado potencial de desarrollo de hidrofobia en comparación a otras especies arbustivas más aromáticas, con un mayor contenido en esencias aromáticas y ceras en las hojas.

En el área de Finestrat se dispone de una parcela de simulación con acumulación de hojarasca alrededor de un esparto, ajustándose a las necesidades y naturaleza de la circunstancia de la ladera BEN. Para la asignación se calcula un coeficiente de corrección que sintetice el efecto producido por la incorporación en superficie de la hojarasca. Para ello se asume que la hojarasca se asienta sobre un suelo con <25% de pedregosidad en superficie (FR25su), como es el caso de Finestrat y Benidorm, siendo el cálculo del *coeficiente de hojarasca*:

$$\text{Coef. Hojarasca} = FI10_{\text{hojarasca sobre FR25su}} / FI01_{\text{FR25su}}$$

Para obtener en BEN la asignación de la cobertura de hojarasca, se aplica este coeficiente a la clase de componente superficial de <25% de fragmentos rocosos en superficie (RF25su):

$$BEN_{\text{hojarasca}} = BEN_{\text{FR25su}} \times \text{Coef. Hojarasca}$$

En Cocoll sur destaca la presencia de individuos muertos de aliaga (*Ulex parviflorus*) como componente principal de cobertura de material vegetal seco en superficie. En este caso la superficie total ocupada es mucho más relevante que en los casos anteriores, lo que presupone una mayor relevancia en los procesos a escala de ladera que en los casos de material de residuo vegetal anteriores, ver Figura 5.26.

La Tabla 5.8 resume los criterios de asignación de los parámetros de la ecuación de Horton. Es importante considerar que pese al reconocimiento de una dinámica temporal de cambio en la respuesta hidrológica superficial con la progresiva descomposición de la planta, se requiere la asignación de una única *curva tipo de escorrentía* para esta clase de cobertura, por lo que en la estimación de los parámetros irá dirigido a establecer una especie de situación promedio entre la variación de respuesta real esperada. Otro motivo que justifica esta consideración promediada de la respuesta es que la cartografía no incluye una gradación de estadios de descomposición.

Tabla 5.8 Resumen del protocolo de asignación de los parámetros para las superficies de material vegetal seco (hojarasca y plantas muertas).

clase Materia Seca	Protocolo asignación	
HOJARASCA _{BEN}	Coefficiente de hojarasca:	$HOJAR_{coef.} = FR25su_{con-HOJAR} / FR25su_{sin-HOJAR}$
ANUALES SECAS _{BES}	Respuesta análoga a planta viva = Herbáceas	
ALIAGA MUERTA _{CCS}	Estima en base a prop. superficiales CLAVE	P0: Retraso por densa capa aérea de interceptación
		α : Abrupto por intensa hidrofobia de agua no afectada por infiltración por macroporosidad
		Fc: Media-alta: hidrofobia compensada en algún grado por suelo con macroporosidad

Finalmente la Figura 5.34 muestra los *hidrogramas tipo* resultantes de la asignación de la respuesta para las tres situaciones de las tres laderas. Observándose la escasa participación en la escorrentía de la fracción de material vegetal seco en BES, si bien, desde el momento de la completa dismantelación de la estructura aérea de la planta seca (efecto del impacto de la lluvia y viento), se espera un retorno de la respuesta hidrológica de la superficie de suelo ocupado por estas plantas anuales a una situación típica de suelo sin vegetación, incrementándose de nuevo y rápidamente las tasas de escorrentía. Se asume esto por la escasa entidad y tiempo de permanencia de la planta *in situ*, pues su propia germinación y desarrollo depende de pulsos interanuales húmedos que propician la proliferación de estos terófitos, en este caso además con una distribución salpicada en el espacio. Esta reducida permanencia temporal y alcance espacial impide el efecto de retroalimentación consistente en el desarrollo de *islas de fertilidad* desencadenado por la propia presencia de vegetación (i.e. concentración de recursos, nutrientes, agua y sedimentos; mejora de las propiedades estructurales de los suelos, etc.), si bien, la espontánea y espacialmente aleatoria aparición de herbáceas en determinados momentos, sí puede ejercer un papel a largo plazo de mejora generalizada de las propiedades edáficas de los suelos, incrementando su contenido en materia orgánica y favoreciendo la actividad microbiana.

Respecto de los *hidrogramas tipo* de BEN y CCS sí se reconoce un efecto importante en el balance de escorrentía, llegando incluso a superar las tasas finales de escorrentía respecto a las áreas no-vegetadas (Figura 5.34). Entre la *curva tipo* resultante de la hojarasca propiamente (BEN) y la de la aliaga muerta (CCS) existe un fuerte contraste en los tiempos de inicio de la escorrentía (P0) y la velocidad de alcance de la estabilidad (α), si bien las tasas finales de escorrentía han resultado más próximas (Fc) (Figura 5.34). Con ello se ha querido dotar de una mayor intensidad del fenómeno de hidrofobia en la aliaga muerta, con un incremento muy rápido una vez iniciada la escorrentía. Asignar un importante retraso de la respuesta (elevado Po) se justifica por el efecto de la espesa capa aérea del material vegetal seco sobre la superficie con todavía una gran capacidad de interceptación de la lluvia (Figura 5.26). Pese al supuesto de una mayor presencia de sustancias hidrofóbicas bajo la aliaga muerta respecto de la hojarasca de *esparto*, el resultado de la asignación muestra unos valores de Fc muy similares, incluso a favor de la hojarasca. Esto se justifica por las sustanciales diferencias en las propiedades de partida de la superficie del suelo y sus capacidades asociadas de infiltración. En el

caso de la hojarasca, ésta se asienta en una superficie de suelo desnudo con algún grado de pedregosidad (<25% FR) con altas tasas de escorrentía (Figura 5.27). Mientras que en el caso de la aliaga muerta, ésta parte de un suelo óptimo desde el punto de vista de la infiltración (i.e. sumidero puro), al tratarse de un suelo bien estructurado y con presencia de flujos preferenciales que favorecen la infiltración y redistribución del agua del suelo, esencialmente vía el sistema radicular (*efecto embudo*).

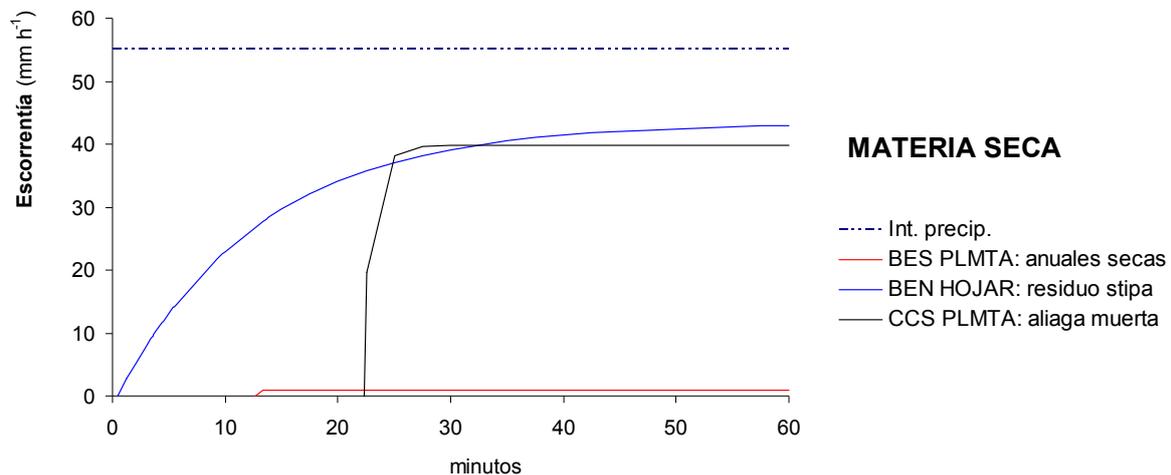


Figura 5.34 Hidrogramas tipo resultantes del Sistema de Asignación para la tipología de superficies de material vegetal seco (hojarasca y plantas muertas) para las tres laderas de estudio.

5.4. HIDROGRAMAS TIPO PER CSS Y LADERA DE ESTUDIO

En la Tabla 5.9 se recopilan todos los resultados obtenidos de la asignación de valores de cada uno de los parámetros de Horton para las tres laderas.

A partir de los valores obtenidos de cada uno de los parámetros se han construido los *hidrogramas tipo* de intensidades de escorrentía a partir de la ecuación de Horton (Ecuación 5) para todas las clases de superficies cartografiadas en cada ladera (Figura 5.35), cumpliendo con el requisito general. Se observa cómo las superficies generadoras o fuentes de escorrentía (*source areas*) son las que marcan las diferencias entre sitios.

El Sistema de Asignación que se ha implementado basado en el análisis de la respuesta intentando aislar el factor LOCAL del factor CSS ha permitido cubrir, a pesar de las importantes carencias de simulaciones de lluvia, todo el rango de superficies que las diferentes cartografías de cada sitio demandaban. Una propiedad fundamental del resultado obtenido con esta metodología es la congruencia de las curvas en base a unos modelos concretos de respuesta definidos a partir del análisis previo de la respuesta, eliminando así fuentes de desviación con origen en las casuísticas particulares de las simulaciones de lluvia. El resultado son *hidrogramas tipo* que simultáneamente representan el carácter del sitio (efecto LOCAL) y las relaciones de proporcionalidad entre CSS como agentes de modulación de la respuesta (efecto CSS). Mantener esta coherencia es especialmente

relevante en un contexto cuyo objetivo se dirige al análisis comparativo de la respuesta integrada a escala de ladera entre diferentes ambientes.

Tabla 5.9 Síntesis de resultados de asignación de valores de los parámetros de Horton para todas las superficies cartografiadas en cada área de estudio. FR: fragmentos rocosos; R: rugosidad superficial; D: dinamicidad superficial; S: sellado efectivo.

			Prop. Superf.			BES			BEN			CCS			
			R	D	S	P ₀	α	Fc	P ₀	α	Fc	P ₀	α	Fc	
NO VEGETADO	Afloramientos rocosos	ROCA	2	1	7	0.83	3.3 9	4.18	0.83	3.3 9	4.18	0.83	3.3 9	4.18	
	<25% FR	en superficie	FR 25su	12	6	3	1.39	9	0	1.65	9	4	1.69	6	9
		embebidas	FR 25em	10	7	4	1.27	0.1 9	31.8 6	1.49	0.1 9	40.3 0			
	25-70% FR	en superficie	FR 50su	45	4	2	3.29	2	4	4.38	2	8			
		embebidas	FR 50em	35	5	5	2.71	0.1 9	30.7 2						
	>70% FR	en superficie	FR 70su	85	2	1	5.59	0	9	7.68	0	3	7.96	5	9
		embebidas	FR 70em	40	3	6	3.00	0.3 5	29.5 8						
	MAT. SECA	Materia seca	hojarasca	HOJAR						0.43	0.0 8	11.6 8			
			planta muerta	PLMTA			9.51	4.0 6	53.9 9			20.0 0	1.0 0	15.2 1	
	VEGETADO	Stipa	STIPA				3.45	1.2 1	54.6 4	3.45	1.2 1	54.6 4			
		Herbáceas	HERBA				9.51	4.0 6	53.9 9	9.51	4.0 6	53.9 9	9.51	4.0 6	53.9 9
		Arbustos	ARBUS				13.6 3	0.1 7	53.9 8	13.6 3	0.1 7	53.9 8	13.6 3	0.1 7	53.9 8
Pino		PINO				13.6 3	0.1 7	53.9 8	13.6 3	0.1 7	53.9 8				

5.5. SÍNTESIS DE RESULTADOS

Este capítulo, centrado en la respuesta al nivel inferior de escala considerado (parche), ha cumplido con los objetivos correspondientes (Tabla 1.1), de identificación de los CSS como **moduladores** de la respuesta frente a otras variables locales, y con aquellos relacionados con la comprensión del funcionamiento del proceso de escorrentía a esta escala de análisis.

El primer objetivo de reconocer el efecto ejercido por los CSS en la respuesta es en sí mismo un prerrequisito impuesto por la **hipótesis de partida**. Se consigue finalmente discriminar entre los denominados **efecto LOCAL** y **efecto CSS**. Esta conceptualización nos permite abordar la cuestión desde una perspectiva de *modulación* de la respuesta por parte del CSS, sobrepuesta al comportamiento general regido con por las condiciones LOCALES (clima, pendiente, tipo de suelo, etc.).

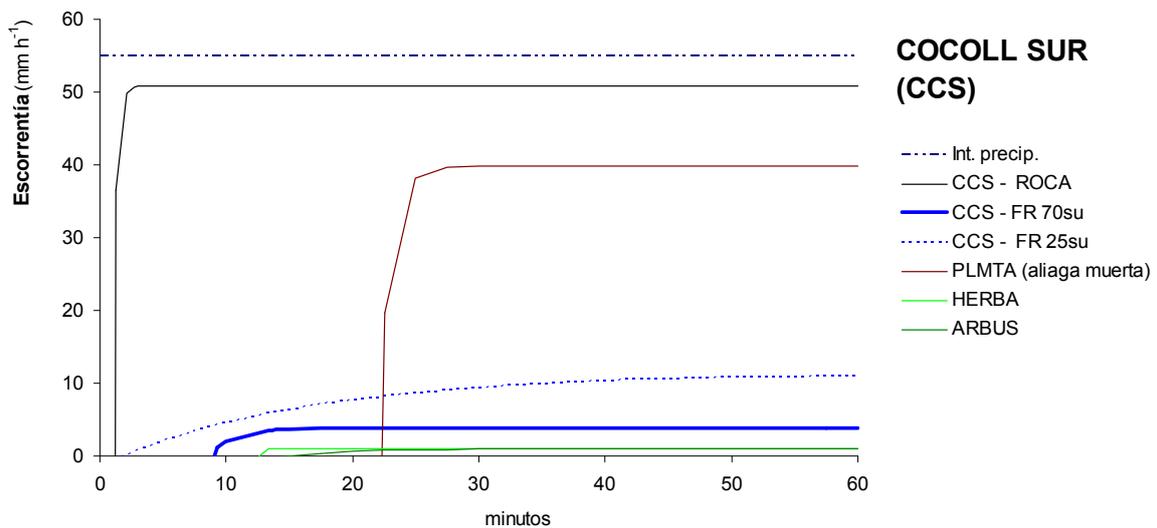
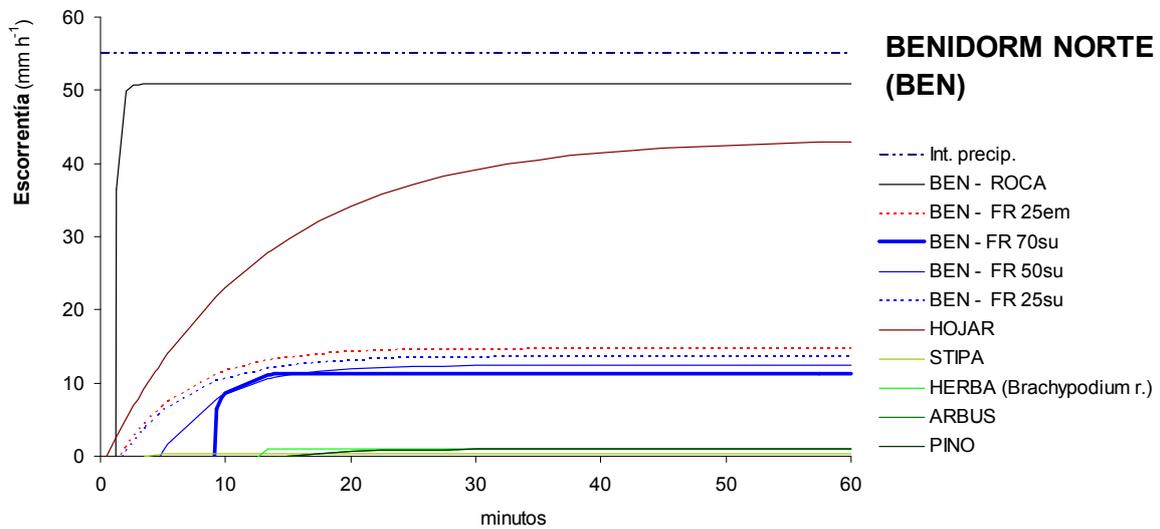
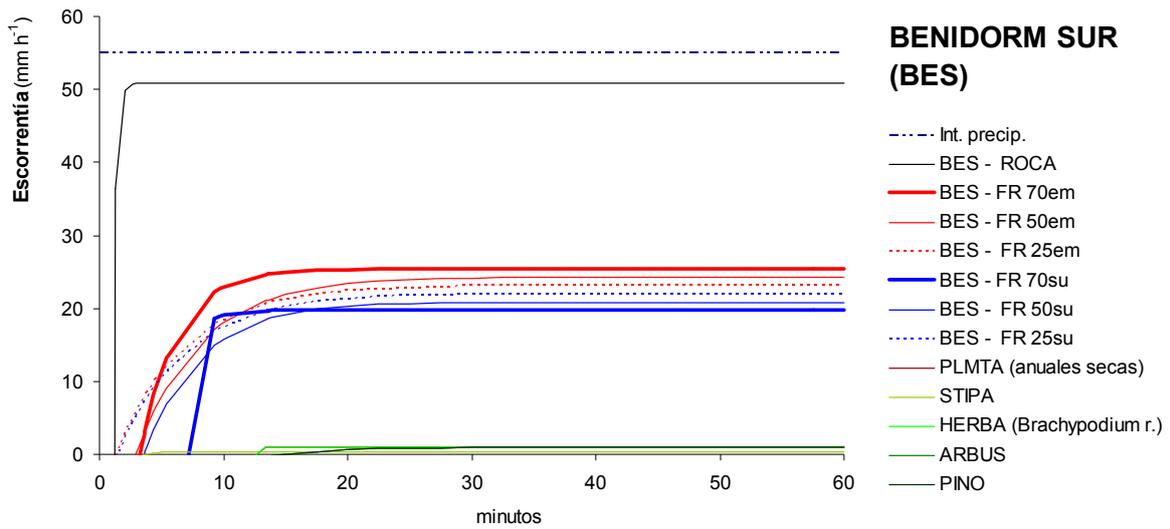


Figura 5.35 Hidrogramas tipo para todas las superficies de la cartografía de componentes superficiales derivadas de la asignación de valores de los parámetros de Horton para las tres laderas de estudio.

Esto se consigue con la identificación de determinados **gradientes de respuesta** en función de algunas las **variables LOCALES** más significativas: la climática, el gradiente de pendiente y de degradación de los suelos (Figura 5.7). Se destaca la diferente amplitud en la respuesta en el rango de CSS encontrado en función del gradiente de pendiente (Figura 5.5). Esto se relaciona con un mayor margen de diferenciación en la respuesta por parte de los CSS a medida que incrementa la energía en el sistema.

El **efecto CSS** se logra descomponer desde la **perspectiva metodológica proceso-patrón**, en la que se analiza la interacción de la respuesta (*proceso*) con las diferentes propiedades superficiales asociadas a cada CSS (*patrón*), en lo que hemos denominado **propiedades superficiales clave** (Figura 3.3.3). La respuesta se parametriza en base al ajuste de la ecuación de Horton (P_0 , α y F_c), posibilitando así un **sistema de análisis** semi-cuantitativo basado en la búsqueda de relaciones entre ambos aspectos.

Respecto del efecto CSS se diferencian dos dominios de comportamiento según se trate de superficies **vegetadas** o **no-vegetadas**. Del grupo de las **vegetadas**, cuya amplitud de respuesta es muy limitada al comportarse básicamente como sumideros netos de escorrentía, estas *propiedades clave* se resumen en sus características **fisinómicas** (Figura 3.3.10).

Mientras que para las **no-vegetadas**, donde el rango de superficies y de respuestas se amplía, el proceso de análisis es más complejo (Figura 3.3.4), habiéndose establecido diferentes estrategias según su **naturaleza** y su **disponibilidad** de RFS. Destacamos por su importancia el caso de las **superficies con presencia de FR**, cuyas *propiedades clave* han resultado siendo la rugosidad, la dinamicidad de la superficie y el grado de sellado efectivo y protección a los impactos de las gotas de lluvia, asociándose con los parámetros de P_0 , α y F_c respectivamente (Figura 5.25). Además se corrobora parte de estos resultados a partir del modelo propuesto por Poesen (1990) sobre el efecto de la cobertura y posición de los FR respecto de las superficies (Figura 5.24).

El conocimiento generado en el **sistema de análisis** sobre la relación de las formas (CSS) con el proceso de escorrentía (respuesta desagregada en los tres parámetros de Horton) permite una última **fase de asignación** de los tres parámetros de Horton (Tabla 5.9) para la obtención de un **hidrograma tipo** a cada CSS en cada área de estudio (Figura 5.35). Los cuales integran simultáneamente el efecto LOCAL de cada sitio y el efecto modulador de cada CSS en la respuesta, siendo en sí mismos **modelos de respuesta de base empírica a escala de parche** (*response units*), que luego alimentarán el modelo de simulación a escala de ladera (Capítulo 7).

En la metodología de asignación se establece la diferenciación entre **respuesta universal o local** (Figura 3.3.9), reconociéndose así dos diferentes grados de modulación de los CSS. La **respuesta universal** se corresponde con la situación en la que el *efecto CSS* sobrepasa el *efecto LOCAL*, y por tanto no precisa en la fase de asignación una adaptación de la respuesta por sitio, siendo el ejemplo paradigmático el caso de la vegetación (**sumideros** de escorrentía netos), o los afloramientos de roca madre (productores de escorrentía con independencia del ambiente). El resto de CSS se rige bajo una respuesta intermedia de modulación, y por tanto precisa de un *ajuste local* de la respuesta según el área de estudio.

En términos generales en este capítulo, mediante métodos semi-cuantitativos y adaptados a la disponibilidad de RFS, se busca un conocimiento óptimo de las relaciones proceso-patrón a escala de parche, de modo que permite la interpolación de la respuesta de todo el rango de CSS partiendo de unos datos relativamente escasos de RFS en cada área de estudio.

Se destaca este avance en cuanto que los experimentos de simulación de lluvia (RFS), pese a su simplificación, son un procedimiento costoso de obtención, por lo que la propuesta que aquí se plantea de análisis y asignación de la respuesta reducen de manera importante los requerimientos en el número de experimentos de RFS para caracterizar el rango de CSS de un sitio. El simulador aquí utilizado (Calvo *et al.*, 1988; Cerdà *et al.*, 1997) ha tenido un uso extendido en el ámbito del semiárido, del que además recientemente se ha recobrado interés ante iniciativas de estandarización de las metodologías y protocolos de simulación en campo por parte de Iserloh *et al.* (2013), y cuyos autores proponen este simulador como alternativa.

A propósito de la secuenciación de superficies con FR en relación a su gradiente de respuesta (Figura 5.25), señalamos sus implicaciones transversales con el resto de niveles de escala por su relación con el **ciclo de blindaje superficial** (Kirkby *et al.*, 2002, ver Figura 1.8), en la medida que sintetiza el papel de los FR en la evolución de la escorrentía. A partir de este ejercicio de síntesis se determinan dos categorías de sellado superficial con su respectiva manifestación en la respuesta (Tabla 5.4), clasificándose a su vez los diferentes CSS en base a estas categorías. Por un lado se diferencia el sellado *estático* del *dinámico* en función de la evolución del suelo desnudo a lo largo del evento de precipitación (*grado de dinamicidad*); y por otro el sellado *efectivo* del *no-efectivo*, en relación a su efecto sobre la capacidad de infiltración (F_c).

Además, de los resultados aquí obtenidos se abren nuevas cuestiones en relación con los subsiguientes capítulos, en los que se analizan los procesos desde los otros niveles de escala superior. Concretamente nos referimos a **dinámicas de evolución** de los propios CSS a lo largo del tiempo, cuyo ámbito de observación pertenece al nivel de escala intermedio, de parcela o *stand* (Capítulo 6). Si bien aquí se ha descrito la respuesta *in situ* según las características superficiales recogidas en el concepto de CSS, se reconoce la importancia de aproximarnos a las dinámicas de cambio que pueden experimentarse en la superficie del suelo más allá de las retroalimentaciones ya descritas para el caso de la vegetación (Puigdefábregas, 2005). En este sentido le reconocemos al ciclo de blindaje superficial el papel de **control abiótico** de las propiedades del suelo (Thornes *et al.*, 1996; Kirkby *et al.*, 2002, ver Figura 1.8) y por extensión, e implícito en nuestra hipótesis, un papel fundamental en la distribución de patrones de CSS a lo largo de la ladera y por tanto de su respuesta a la escorrentía. La siguiente cuestión que queda abierta es la idoneidad del uso de *modelos integrados de respuesta empíricos (hidrogramas tipo)* desde escalas de detalle para la extrapolación a la escala de ladera, y que se resuelve en el apartado de simulación de la escorrentía a dicha escala (Capítulo 7).

CAPÍTULO 6

INTERACCIÓN ESPACIO-TEMPORAL DE DIFERENTES CSS BAJO CONDICIONES DE LLUVIA NATURAL: ESCALA DE PARCELA (*STAND*)

La respuesta del suelo a los eventos de precipitación es la suma de la escorrentía junto a la carga sedimentaria que ésta acarrea, cuyas condiciones óptimas de cuantificación son las de lluvia natural *in situ*, en las que se suceden las diversas interrelaciones reales entre componentes del suelo, tanto de su superficie como del interior.

Un periodo de medida largo es asimismo necesario para la detección de las diferentes situaciones que incluyan umbrales de respuesta, teniendo la ventaja añadida de poder llegar a registrar una gran variedad de eventos de precipitación y poder tener observaciones de la respuesta hidrológica en una situación representativa a más largo plazo. Sin embargo, este plazo largo lleva asociado la posibilidad de evolución de las propias condiciones iniciales en las propiedades de los suelos, especialmente de su superficie, lo que desde otra perspectiva, supone una oportunidad de constatar cómo las dinámicas de cambio ocasionan su respectiva modificación en la respuesta geomorfológica.

El objetivo de este capítulo es definir, bajo condiciones de lluvia natural, los umbrales de escorrentía y de movilización de sedimento a escala de parcela tanto en la dimensión espacial (relativos a las condiciones de la superficie del suelo) como en la temporal (características de la precipitación) en las dos condiciones de contraste climático del subhúmedo (Cocoll, CC) y semiárido (Benidorm, BE). Este capítulo describe y analiza los resultados de la base de datos de campo de 59 eventos recogidos durante 7 años (1996-2003; Tabla 6.1) y se basa en una publicación previa (ver Calvo-Cases *et al.*, 2005), posteriormente se siguieron tomando datos hasta 2008, Estos 5 últimos años no se han incluido tras confirmar que no introducen cambios sustanciales en los resultados. Las parcelas estudiadas se encuentran dentro de las franjas cartografiadas en el capítulo 4, concretamente en las extensiones hacia la derecha que en BES y CCS se representan en las figuras 4.1 y 4.2. Sus características se han explicado en el apartado 3.2.2.

6.1 PROPIEDADES DEL SUELO Y COMPONENTES SUPERFICIALES: EFECTOS EN LOS PROCESOS.

Atendiendo a la distribución de los componentes superficiales del suelo (Tabla 6.1) en el área de drenaje de cada parcela (0.5 x 3 m aguas arriba del colector; figura 6.1), la superficie que se encuentra protegida por la vegetación y el área cubierta por hojarasca es mayor en CC. Por el

contrario, la cobertura de fragmentos rocosos, tanto con alta como con baja densidad, es mayor en BE. En términos globales los espacios de suelo desnudo (<25% de fragmentos rocosos) es seis veces superior en BE con respecto a CC. Desde el punto de vista de la configuración de ese patrón, también el tamaño de los espacios individuales de suelo desnudo es así mismo mayor en BE, al tiempo que con una mayor continuidad, y por tanto conectividad espacial entre áreas no-vegetadas.

Tabla 6.1 Valores medios y error estándar de componentes superficiales y propiedades del suelo, precipitación, escorrentía y movilización de sedimentos para las áreas de Benidorm (BE) y Cocoll (CC). (*) Datos procedentes de Boix Fayos *et al.* (2001). (**) Acumulado, considerando sólo las parcelas del período 1996-2003.

Característica	BE	CC
Cubierta Superficial (%)		
Vegetación	48.70 (±8.0)	63.90(±8.6)
Hojarasca	1.86 (±0.7)	6.24(±2.3)
>50% de Fragmentos Rocosos	26.80(±5.8)	22.49(±6.3)
25-50% de Fragmentos Rocosos	11.30(±2.8)	5.02(±2.2)
Suelo desnudo (<25% Fragmentos Rocosos)	11.10(±4.8)	1.86(±0.8)
Afloramientos de Roca Madre	0.29(±0.2)	0.49(±0.5)
Distribución de Agregados (%)*		
Diámetro Medio de los agregados (MWD) (mm)	1.96	0.86
Ratio Microagregación/Macroagregación (RMM)	0.39	1.49
Promedio de las distancias a la vegetación (cm)		
media	25.50(±11.5)	26.00(±10.1)
máxima	70.00(±37.5)	40.00(±13.6)
Precipitación referida al periodo completo		
Precipitación total (mm)	2453.60	5788.60
Media de Precipitación por Evento (mm)	41.60(±5.2)	76.20(±11.1)
Media de I30 max. (mm h ⁻¹)	13.00(±1.7)	14.5(±1.6)
Media de I10 max. (mm h ⁻¹)	19.70(±2.4)	20.20(±2.2)
Flujo superficial en parcelas acumulado**		
Escorrentía (l m ⁻¹)	416.00	414.00
Sedimento fino (g m ⁻¹)	987.00	186.00
Sedimento grueso (g m ⁻¹)	1745.00	143.00
Sedimento total (g m ⁻¹)	2733.00	330.00

VARIABLES relacionadas con la estructura del suelo (i.e. indicadores de agregación y contenido de piedras en la matriz de suelo), muestran bastantes diferencias significativas entre ambos sitios, indicando mucho mayor tamaño de agregados y un muy elevado contenido de piedras en la matriz del suelo de BE con respecto a CC (Boix-Fayos *et al.*, 2001).

En BE la distancia media del colector a las plantas tiene una buena correlación con la escorrentía ($r = 0.94$) y sin considerar la parcela BE2 -en la que una nueva planta ha ido desarrollándose cerca del colector- también se observa una buena correlación ($r = 0.97$) entre la mínima distancia a las plantas y la tasa de transporte de sedimento fino. En CC el transporte de sedimento fino tiene una buena correlación con la distancia media a las plantas ($r = 0.88$), mientras que la escorrentía no muestra ninguna correlación significativa.

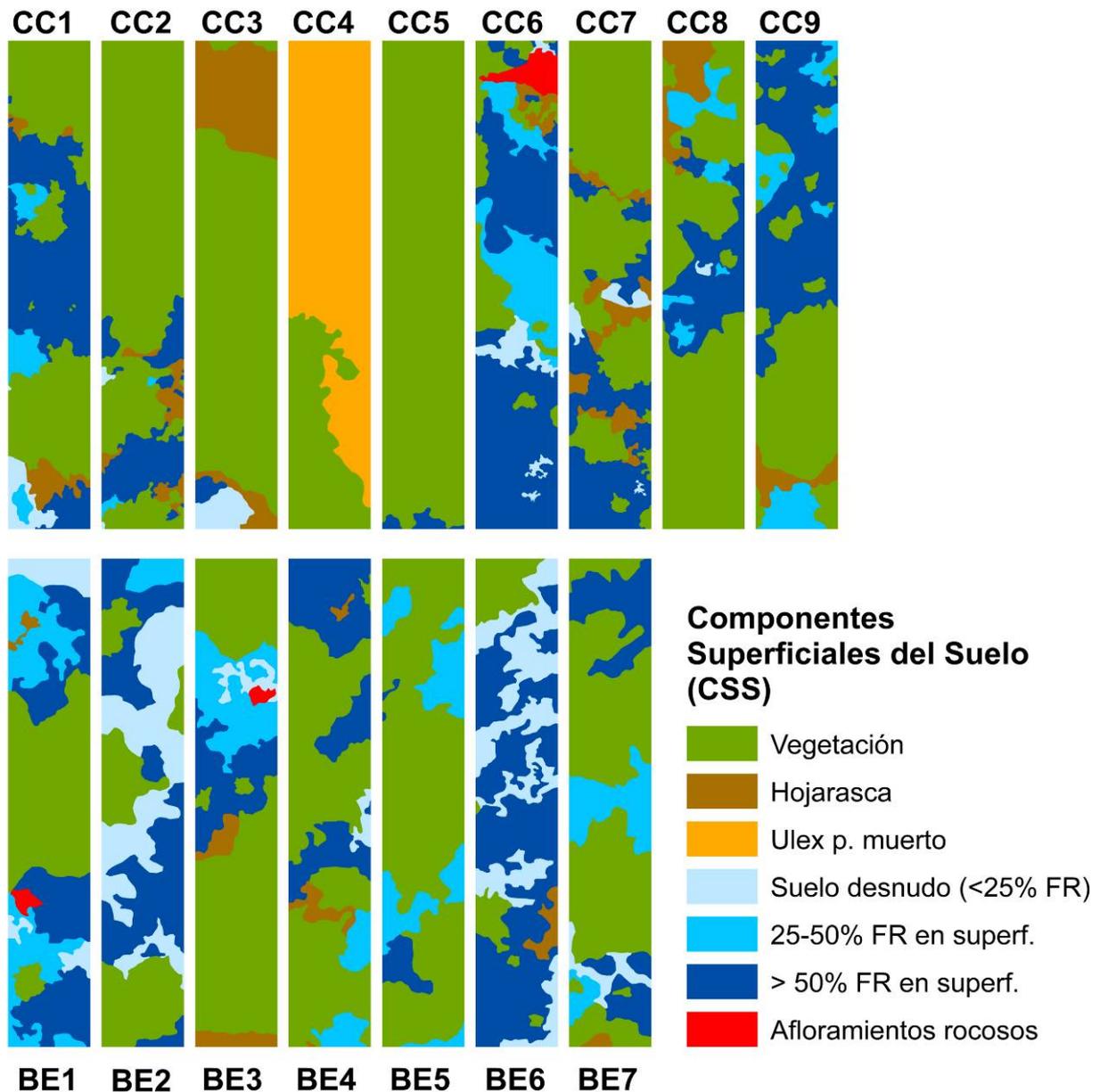


Figura 6.1 Distribución de los componentes superficiales del suelo cartografiados en un rectángulo de 50 x 300 cm aguas arriba de cada colector de parcela.

Aunque la media de las distancias desde los colectores hasta la vegetación es similar en ambos sitios, los valores de distancia máxima a las plantas en cada parcela, reflejan que la presencia de pasillos de

suelo desnudo entre plantas es más frecuente en BE. Por consiguiente, son las plantas y la hojarasca los principales protectores del suelo en Cocoll, aunque la pedregosidad es también relevante. En el caso de Benidorm, con una importante cobertura vegetal en las condiciones más secas, la pedregosidad superficial es mucho más importante que en Cocoll, a la vez que las áreas de suelo desnudo.

6.2 CARACTERÍSTICAS DE LA PRECIPITACIÓN

Durante el período de medida la cantidad total de precipitación registrada fue 2.4 veces superior en Cocoll. Promediando la cantidad de lluvia registrada para cada período de colección de datos (eventos) los valores fueron 1.8 veces superiores en Cocoll. La media de las intensidades máximas de cada período medida como I30 e I10 medias es ligeramente superior en Cocoll (Tabla 6.1) aunque los valores máximos de intensidad son más altos en Benidorm para la I10 y mayores en Cocoll para la I30.

El número de tormentas de elevada magnitud ocurre más frecuentemente en CC. Para el mismo período de tiempo (1996-2003) el número de eventos de más de 25 mm ha sido 31 en BE y 52 en CC. Los de más de 100 mm de lluvia, 5 y 19 eventos en BE y CC respectivamente. El evento máximo registrado en BE ha sido de 187 mm (169.2 mm en un único chaparrón o período de lluvia sin interrupción mayor de 6 horas (ver Usón and Ramos, 2001), mientras que en CC esta magnitud ha sido sobrepasada en diez ocasiones, siendo la máxima registrada de 476.2 mm (395.4 mm en un único chaparrón). Asimismo las características de las tormentas presentan diferencias, tal y como puede observarse en la Figura 6.2, en la que se representa la distribución de la intensidad de las dos tormentas extremas de cada sitio, en la que BE muestra chaparrones más cortos y de mayor intensidad.

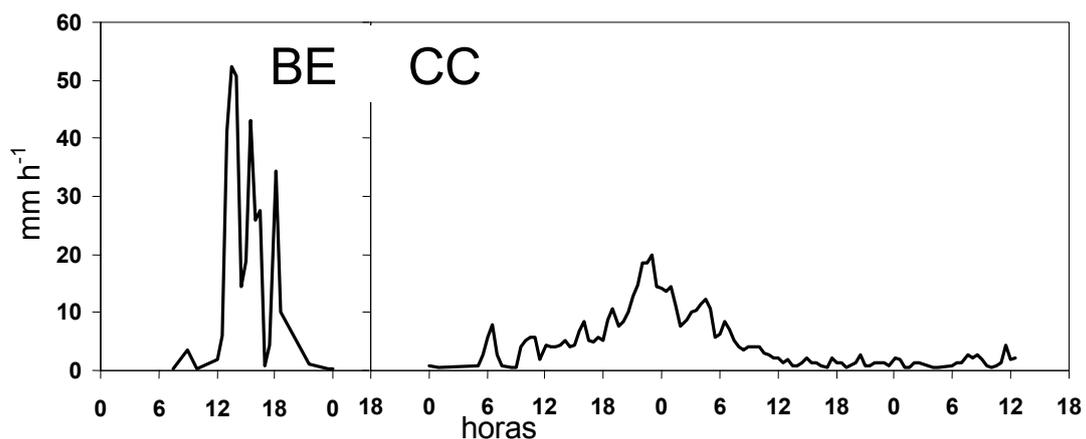


Figura 6.2 Distribución de la intensidad de la precipitación en intervalos de 30 minutos durante los dos eventos extremos, en Benidorm (BE) en Octubre de 1997 (precipitación total de 187mm) y en Cocoll (CC) en Abril de 1997 (precipitación total de 253.8mm).

Tabla 6.2 Coeficientes de las correlaciones de Pearson entre variables de propiedades de la precipitación y escorrentía (Esc), y sedimento fino (Fs), grueso (Gs) y total (Ts).

Parcela		Precipitación				Sedimento					
		Precip. Total	Intensidad precip. media	I30	I10	Precip. Total	Intensidad precip. media	I30	I10		
CC1	Esc	0.58*	0.29*	0.51*	0.45*	BE1	Esc	0.77*	0.45*	0.77*	0.73*
	Fs	0.27*	0.27*	0.64*	0.65*		Fs	0.54*	0.36*	0.69*	0.67*
	Cs	0.17	0.02	0.11	0.08		Cs	0.53*	0.35*	0.68*	0.65*
	Ts	0.24*	0.09	0.29*	0.26*		Ts	0.54*	0.35*	0.68*	0.66*
CC2	Esc	0.64*	0.33*	0.51*	0.48*	BE2	Esc	0.59*	0.34*	0.51*	0.46*
	Fs	0.22	0.21	0.48*	0.50*		Fs	0.52*	0.35*	0.68*	0.66*
	Cs	0.21	0.12	0.30*	0.35*		Cs	0.50*	0.33*	0.61*	0.60*
	Ts	0.28*	0.23*	0.54*	0.58*		Ts	0.50*	0.33*	0.63*	0.62*
CC3	Esc	0.53*	0.03	0.34*	0.27*	BE3	Esc	0.71*	0.50*	0.86*	0.81*
	Fs	0.27*	0.23*	0.73*	0.62*		Fs	0.57*	0.36*	0.74*	0.72*
	Cs	0.29*	0.27*	0.60*	0.58*		Cs	0.54*	0.37*	0.72*	0.69*
	Ts	0.28*	0.25*	0.75*	0.64*		Ts	0.56*	0.37*	0.74*	0.71*
CC4	Esc	0.56*	-0.03	0.26*	0.19	BE4	Esc	0.56*	0.44*	0.85*	0.81*
	Fs	-0.01	0.26*	0.12	0.09		Fs	0.57*	0.39*	0.77*	0.74*
	Cs	0.18	0.13	0.24*	0.23*		Cs	0.58*	0.40*	0.75*	0.72*
	Ts	0.00	0.27*	0.13	0.10		Ts	0.58*	0.39*	0.77*	0.73*
CC5	Esc	0.67*	0.33*	0.56*	0.52*	BE5	Esc	0.80*	0.49*	0.81*	0.76*
	Fs	0.13	0.22	0.47*	0.50*		Fs	0.76*	0.31	0.59*	0.57*
	Cs	0.05	0.25*	0.22	0.29*		Cs	-0.01	-0.01	-0.02	0.05
	Ts	0.11	0.31*	0.43*	0.50*		Ts	0.59*	0.25	0.46*	0.47*
CC6	Esc	0.61*	-0.10	0.44*	0.33	BE6	Esc	0.59*	0.47*	0.66*	0.66*
	Fs	0.64*	0.27	0.72*	0.69*		Fs	0.40*	0.36*	0.71*	0.66*
	Cs	0.22	0.31	0.48*	0.51*		Cs	0.49*	0.29*	0.58*	0.57*
	Ts	0.62*	0.29	0.73*	0.71*		Ts	0.52*	0.33*	0.65*	0.64*
CC7	Esc	0.55*	0.06	0.28	0.18	BE7	Esc	0.78*	0.46*	0.76*	0.70*
	Fs	0.34*	0.51*	0.58*	0.66*		Fs	0.78*	0.45*	0.76*	0.72*
	Cs	0.11	0.60*	0.54*	0.71*		Cs	0.74*	0.44*	0.73*	0.69*
	Ts	0.30	0.57*	0.60*	0.72*		Ts	0.76*	0.44*	0.74*	0.70*
CC8	Esc	0.63*	-0.03	0.30	0.22		(*) Correlaciones significativas ($p < 0.05$) Destacados en: azul $r \Rightarrow 0.5$ rojo $r \Rightarrow 0.7$				
	Fs	0.23	0.22	0.16	0.17						
	Cs	0.22	0.16	0.05	0.05						
	Ts	0.24	0.22	0.14	0.15						
CC9	Esc	0.56*	-0.09	0.13	0.07						
	Fs	0.44*	0.46*	0.51*	0.58*						
	Cs	0.09	0.04	0.03	0.04						
	Ts	0.21	0.16	0.17	0.19						

Las variables referidas a la precipitación (total de lluvia, intensidad media, I30 e I10) muestran una correlación significativa con la respuesta de la mayor parte de las parcelas. Especialmente en BE, todas las parcelas, a excepción de la BE05 (con una elevada cobertura de vegetación) en la fracción

gruesa de sedimento, presentan unos coeficientes de correlación positivos y significativos con las variables de escorrentía y sedimento (Tabla 6.2). En contraste, en CC, aunque muchas de las correlaciones se muestran como significativas, especialmente con la escorrentía, los valores son en general más bajos y menos significativos para los sedimentos.

Del análisis del conjunto de datos, se evidencia que otros factores en combinación con la intensidad y duración de la precipitación son responsables de la generación de escorrentía. De hecho, en BE, aunque un umbral de $I_{30} = 25 \text{ mm h}^{-1}$ e $I_{10} = 40 \text{ mm h}^{-1}$ es necesario para generar escorrentía, hay algunos eventos con producción de escorrentía bajo intensidades menores. Sin embargo, en CC se precisa de una mayor cantidad de precipitación para producir escorrentía. Pero una intensidad menor que en BE, algunos eventos con una $I_{10} = 10 \text{ mm h}^{-1}$ pueden llegar a generar escorrentía si la duración es suficiente, generalmente una mayor intensidad ($I_{10} = 30 \text{ mm h}^{-1}$) es necesaria para la producción de escorrentía durante eventos de menor magnitud (c.a. 20 mm), aunque estos umbrales todavía son mayores que los detectados por Cammeraat *et al.* (2002) de 4.2 mmh^{-1} de I_{10} en tormentas de más de 30 mm y el detectado por Martínez-Mena *et al.* (2001) de $10\text{-}15 \text{ mmh}^{-1}$ de I_{30} en zonas de litología mixta y con parcelas de distintos tamaños.

6.3 ESCORRENTÍA Y MOVILIZACIÓN DE SEDIMENTO.

A escala de sitio, las tasas de escorrentía y movilización de sedimento quedan bien explicadas por las diferencias en las propiedades del suelo, las condiciones superficiales del mismo y las tendencias generales en las características de la precipitación. Considerando las parcelas que han estado operativas entre 1996 y 2003, la media de escorrentía de las cinco parcelas muestra un valor muy similar en ambos sitios. La mayor tasa de infiltración medida en CC (1.6 veces superior respecto de BE) a partir de experimentos de simulación de lluvia (Calvo-Cases *et al.*, 2003) no se verifica con los datos de las parcelas bajo condiciones de lluvia natural, debido a las diferentes características de los episodios de lluvia. En CC, donde los suelos tienen una mayor capacidad de infiltración, la mayor duración y magnitud de los eventos de precipitación produce escorrentía bajo mecanismos de exceso de saturación.

En contraste, las tasas de erosión son marcadamente superiores en BE, con un total de movilización de sedimentos ocho veces mayor a CC, en el que la fracción fina de sedimento (<2 mm) es cinco veces mayor y la fracción gruesa veinte veces por encima. Aquí es significativamente mayor la proporción de suelo desprotegido, aunque a esto hay que añadir el importante efecto de las mayores intensidades de precipitación, especialmente para explicar la gran carga de sedimento grueso, incluso gravas, que llega a los colectores.

Considerando las series de datos de todas las parcelas en ambas zonas, este contraste en el transporte de sedimento es menos pronunciado si se incluye la parcela CC6, la cual presenta unos valores de concentración de sedimento muy elevados (Figura 6.3), si bien todavía se mantienen las diferencias entre sitios. Sin embargo, la respuesta hidrológica se mantiene coherente en ambas series de datos.

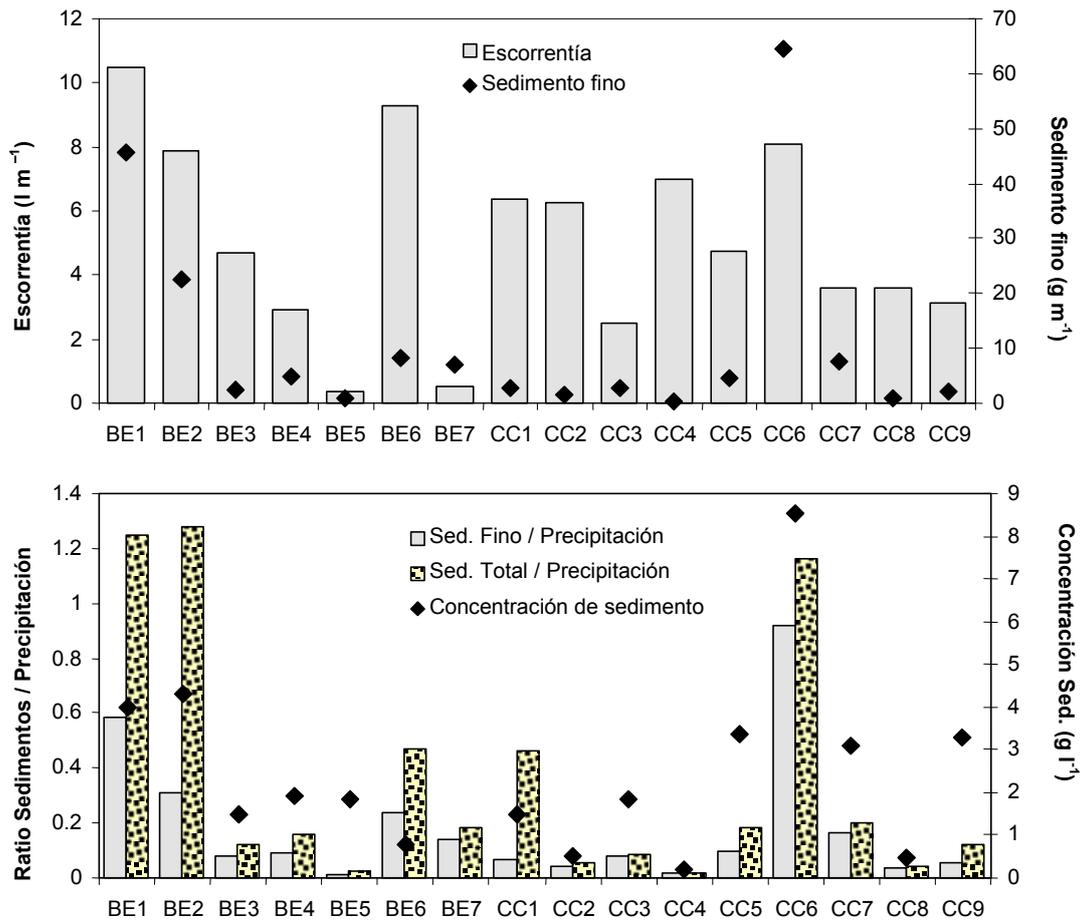


Figura 6.3 Valores medios durante el periodo de medida (el correspondiente a cada parcela) de la escorrentía, producción de sedimento fino, ratio sedimento fino/precipitación y concentración de sedimento en cada parcela.

Considerando el análisis de los valores promedio para las parcelas individuales (Figura 6.3), a excepción de la parcela CC6, los valores son más homogéneos en CC, tanto los de escorrentía como los de transporte de sedimento. La mayor heterogeneidad en BE parece estar relacionada con la mayor variabilidad en las características de la cobertura de vegetación en esta ladera, pero también con la menor duración de los chaparrones, que conlleva un funcionamiento entorno al umbral de generación de escorrentía y/o conectividad de los elementos de la ladera.

6.4 INFLUENCIA DEL TAMAÑO DEL PARCHE O DISTANCIA EN LA MOVILIZACIÓN DE SEDIMENTO.

A partir del cálculo de coeficientes de correlación entre los porcentajes de cobertura de los componentes superficiales del suelo anidados a intervalos de 10 cm (hasta los 300 cm ladera arriba del colector) y el total de producción de sedimento recogido en cada parcela se analizó la influencia de la distancia (o tamaño de patrón) de los diferentes componentes superficiales del suelo sobre la producción de sedimentos en cada parcela. Los valores del coeficiente de correlación quedan representados contra la distancia desde el colector (Figura 6.4) y nos dan una idea de cómo el

porcentaje de cada componente se correlaciona con la fracción fina, gruesa y el total de sedimentos respectivamente.

A pesar de que se observó una tendencia general en ambos sitios de correlaciones negativas entre producción de sedimento y vegetación y hojarasca; y correlaciones positivas con las otras tres variables abióticas de la Figura 6.4 (>50% de pedregosidad, <50% de pedregosidad y suelo desnudo), las series de correlaciones mostraron unas curvas muy diferentes para ambos sitios (BE y CC) al considerar la distancia (Figura 6.4).

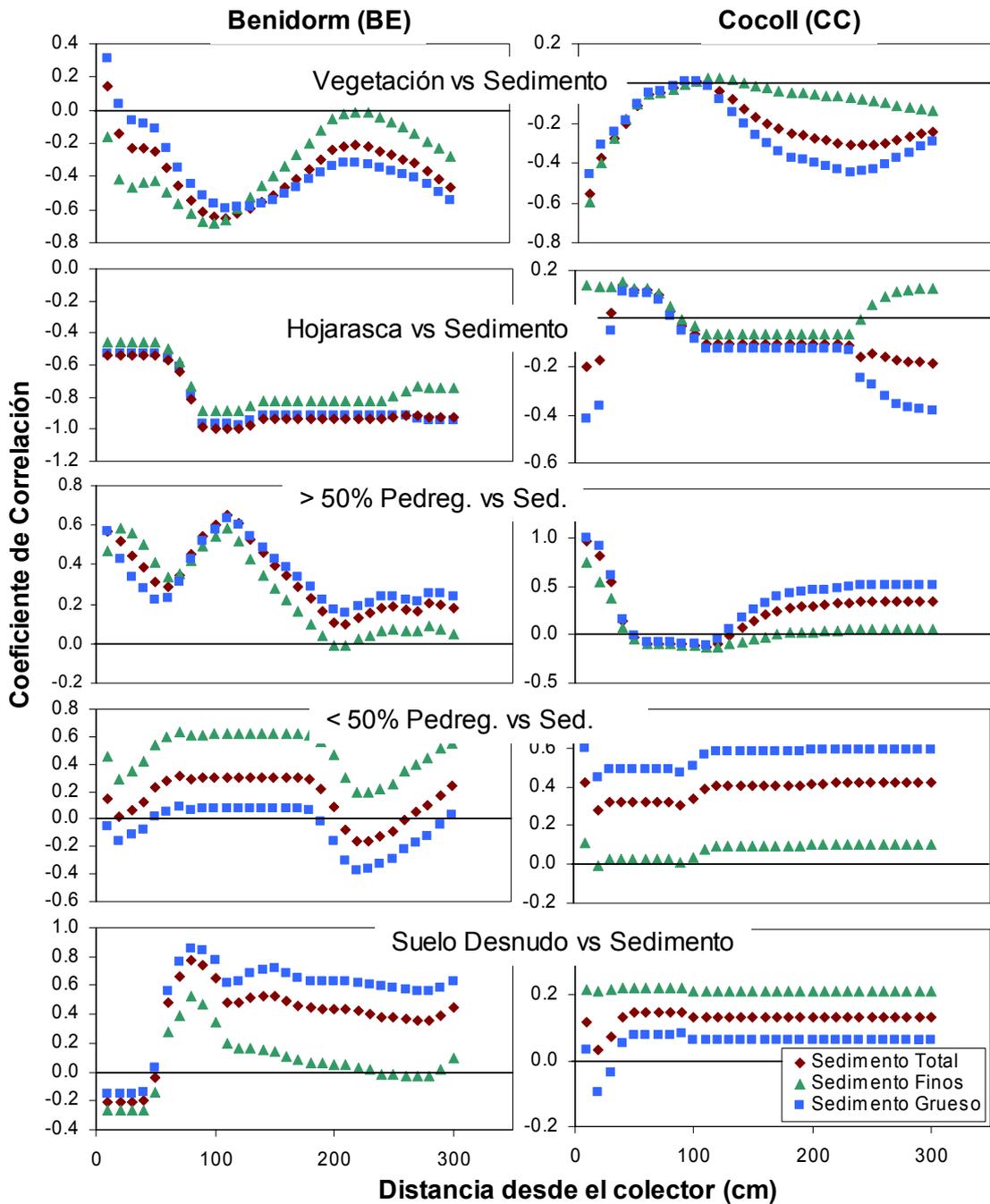


Figura 6.4 Coeficientes de correlación entre el porcentaje de componentes superficiales (desde el colector en intervalos de 10 cm) y el sedimento fino, grueso y total.

En Benidorm los mayores valores de correlación se alcanzaron en torno a un metro de distancia con respecto a la vegetación, la hojarasca y >50% de pedregosidad. El suelo desnudo y <50% de pedregosidad presentaron un mayor valor de correlación en una distancia entre 70-80 cm, distancia a partir de la cual las correlaciones se mantienen altas para estos dos parámetros. El porcentaje de vegetación y de suelo con menos de 50% de fragmentos rocosos mostraron una mejor correlación con los sedimentos finos que con el valor de los sedimentos totales y la fracción gruesa.

La vegetación, la hojarasca y las superficies muy pedregosas muestra una elevada influencia en la producción de sedimentos a distancias en los parches por debajo de 1 m, mientras que en suelo desnudo y superficies con <50% de pedregosidad se asocian con mayor producción de sedimentos a distancias superiores a 2 m. Esto indica que estas superficies menos protegidas pueden proporcionar sedimentos desde distancias más alejadas.

En Cocoll, los mayores coeficientes de correlación entre producción de sedimento y vegetación, hojarasca y porcentaje de suelo con > 50% de fragmentos rocosos se dan a distancias muy cortas, con un máximo a 50 cm y un mínimo a 10 cm. La superficie de suelo con < 50% de pedregosidad y suelo desnudo incrementa su influencia en la producción de sedimento a partir de 1 m y 50 cm de distancia respectivamente. Estos mantienen su influencia por encima de los 3 m de distancia, aunque con unos coeficientes de correlación mucho menores que en el caso de Benidorm, especialmente para la línea correspondiente al sedimento fino.

El tamaño de los parches que influye sobre la producción de sedimentos para el caso de Cocoll es mucho menor que en Benidorm con respecto a la vegetación, hojarasca y superficies de elevada pedregosidad. Suelo desnudo y superficie de suelo con un bajo porcentaje de piedras muestran una influencia sobre la producción de sedimento incluso a distancias mayores de 3 m, aunque con coeficientes de correlación menores que en el caso de Benidorm.

Como consecuencia de ello, procesos de arranque y transporte de sedimento resultan más eficientes en las condiciones presentes en Benidorm debido a que los factores de protección (vegetación y hojarasca) solo son eficientes cuando se encuentran en el primer metro desde el colector, al ser más anchos los pasillos, su eficiencia queda restringida en la distancia. La elevada proporción de cobertura de fragmentos rocosos esta siempre positivamente correlacionada con el movimiento de sedimentos, aunque esto comienza a ser significativo a partir del primer metro. En las condiciones de Benidorm donde las piedras se encuentran sueltas sobre la superficie y se mueven con facilidad, éstas tienen una función protectora menor, como se puede deducir en las altas tasas de movimiento de sedimento grueso (1745 g m^{-1} de media). Por el contrario en Cocoll, las piedras son menos móviles y más estables en el suelo y producen un efecto más positivo en la reducción de las tasas de transporte (143 g m^{-1} de media).

Estos resultados se basan en valores medios obtenidos a partir de las series más largas de datos de las parcelas que funcionaron durante todo el periodo (Figura 3.2.6). Si nos fijamos individualmente en los datos de cada parcela cabe hacer alguna consideración. En Cocoll, la parcela CC6, con un amplio pasillo sin vegetación y rocosidad en la parte alta, tiene las mayores tasas de transporte y concentración de sedimento en la fracción fina para el conjunto del área de Cocoll y también tiene

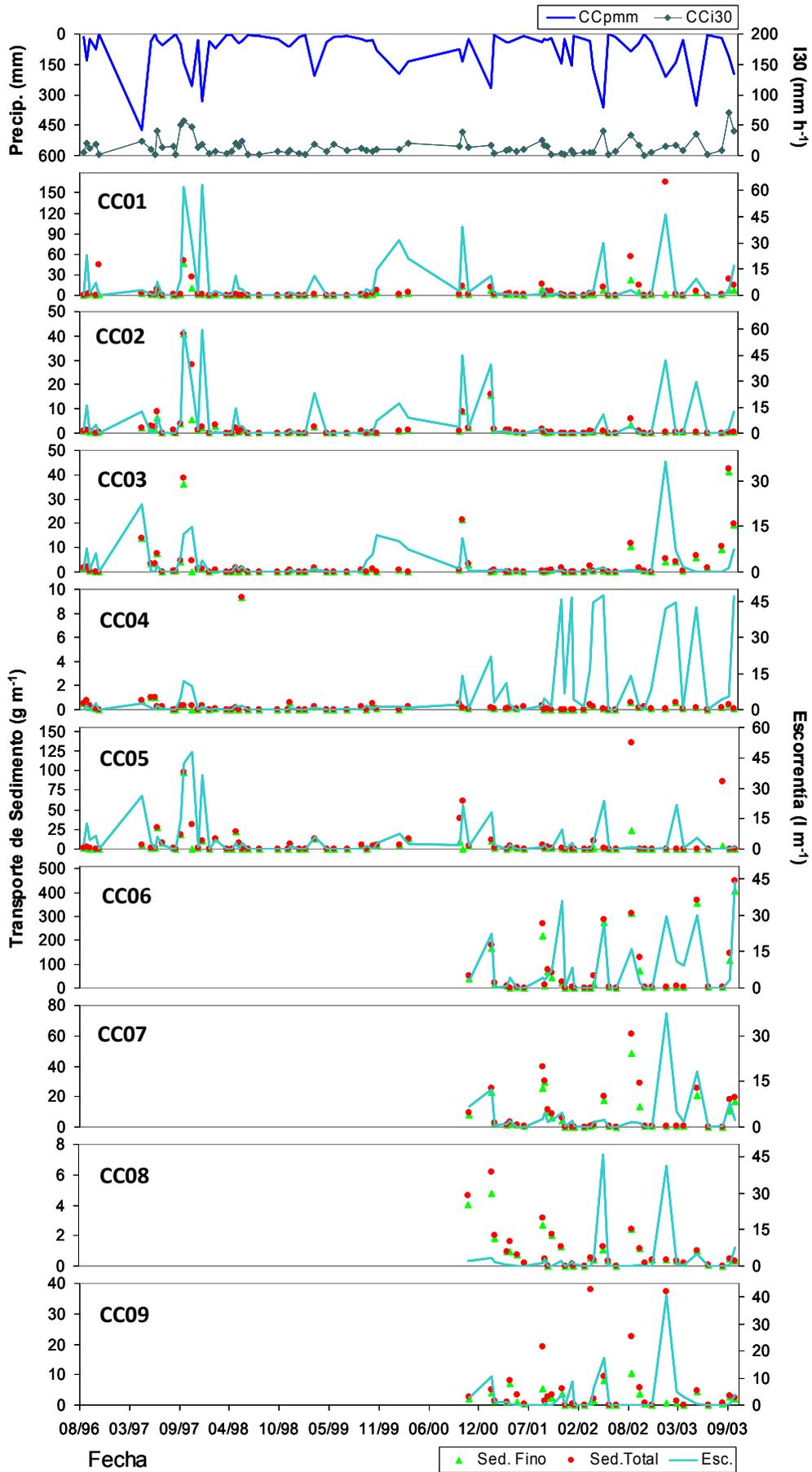
tasas más altas que cualquier parcela del área de Benidorm (Figura 6.3). Estas diferencias decrecen cuando el transporte de sedimento se considera en relación con la precipitación y especialmente cuando la ratio incluye los sedimentos gruesos. En este caso, las parcelas BE1 y BE2 tienen las máximas tasas de transporte (Figura 6.3). Esos resultados muestran la importante sensibilidad erosiva de los suelos de CC cuando se degrada la cubierta vegetal y las lluvias conducen a la saturación del suelo.

6.5 CAMBIOS TEMPORALES EN LAS RELACIONES PRECIPITACIÓN-ESCORRENTÍA-MOVILIZACIÓN DE SEDIMENTO.

El análisis de la serie temporal obtenida para cada parcela (Figura 6.5) es una cuestión compleja, no sólo debido a la variabilidad temporal de la precipitación, sino también a los cambios que se producen en las propiedades y los componentes superficiales del suelo a lo largo del período de estudio. Por un lado se recomienda ampliamente la recolección de datos de erosión en campo durante largos períodos de tiempo (Boix-Fayos *et al.* 2006) para obtener tasas de erosión representativas. Algunos autores recomiendan un mínimo de 3 años (Ollesch y Vacca, 2002), pero al mismo tiempo se advierte de la necesidad de análisis de la dinámica propia de la superficie del área drenante a lo largo del período de estudio, ya que la evolución de los factores de superficie: cambios de vegetación, encostramiento, pedregosidad, determinan la salida de agua y sedimentos. La serie de datos de parcelas analizada aquí es de 7 años, un período de tiempo lo suficientemente largo para apoyar la representatividad de los resultados, y el análisis de los cambios superficiales de las parcelas revela el acoplamiento de la salida de agua y sedimentos a los cambios de superficie.

La cartografía de los componentes superficiales de la Figura 6.1 representa la situación al final del período de medida. Desafortunadamente, no se disponía de cartografía de este alcance (3 m aguas arriba del colector) desde el principio del período, aunque sí se cartografió el primer metro en Agosto de 2000. La parcela CC4 experimentó uno de los principales cambios que pueden afectar a la respuesta de la escorrentía: una elevada proporción del área de la parcela estaba cubierta por una planta de gran tamaño (*Ulex parviflorus*), pero a partir de 2001 cuando ésta se murió, se produjo un drástico incremento de sus tasas de escorrentía, a pesar de que la planta muerta cubría la práctica totalidad de la superficie. La parcela CC5 se caracterizaba al principio del periodo por tener una zona muy pedregosa y desnuda en las proximidades del colector, mayor de la que tiene actualmente, que debido al crecimiento de la vegetación, experimentó una reducción en las tasas de escorrentía.

Otro de los cambios en los componentes superficiales durante el período de medida que han afectado a la respuesta ocurrió en la parcela BE2, donde la planta que en la última cartografía se encuentra cercana al colector no estaba presente al principio de la serie, y en el 2000 era dos veces menor que en la actualidad. Aunque esto todavía no afectó significativamente a la escorrentía hasta 2003 pero ya se observa una tendencia decreciente en los valores de sedimento fino.



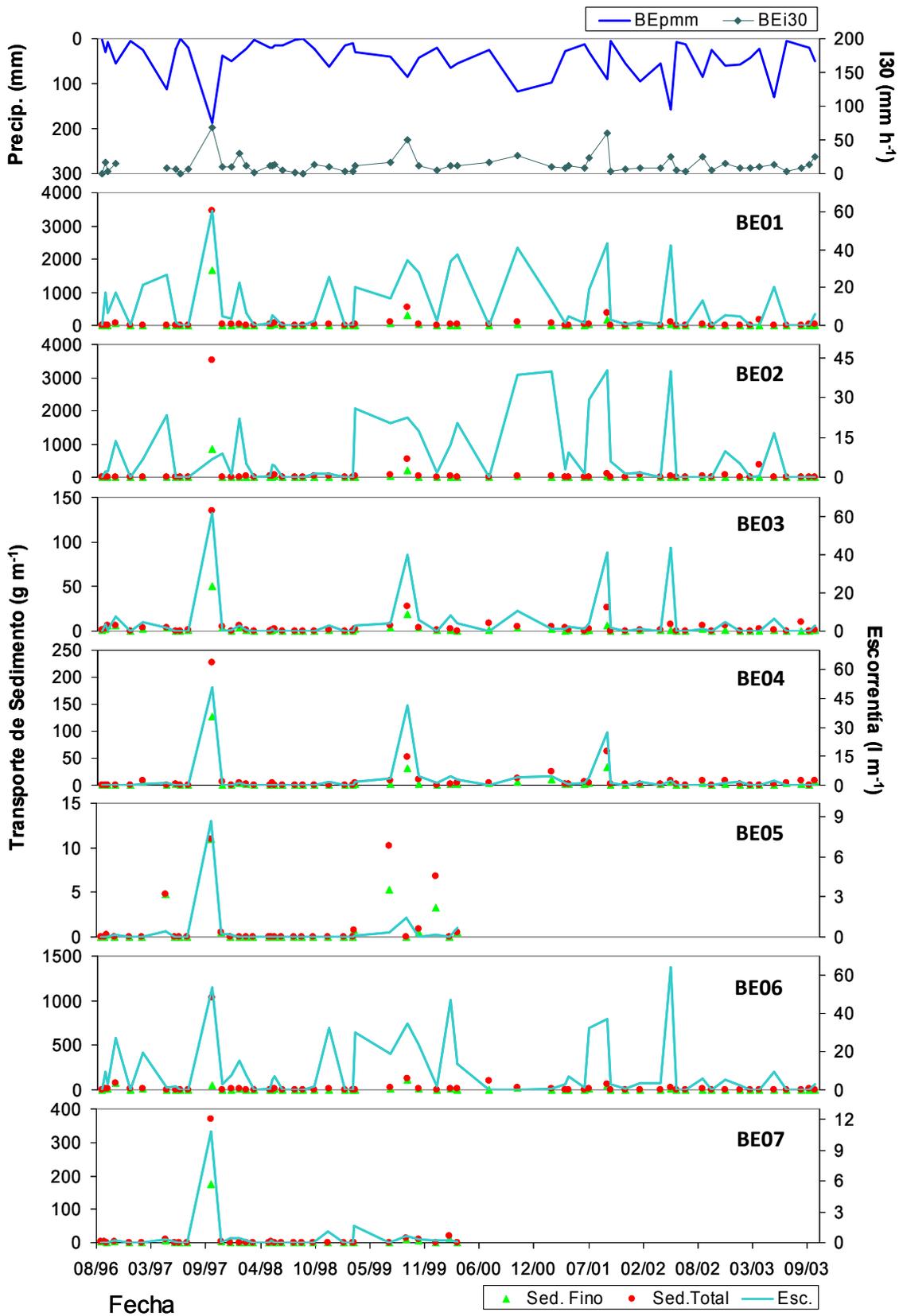


Figura 6.5 Cambios temporales (desde agosto de 1996 a Octubre de 2003) de cada intervalo de colección de datos del total de lluvia, intensidad de lluvia (I30), tasa de transporte de sedimento fino y total y tasa de escorrentía en cada parcela: (a) área de Benidorm (BE) y (b) área de Cocoll (CC).

Las parcelas con las mayores tasas de erosión (BE1, BE2, BE6 y CC6) manifiestan una relación claramente inferior entre escorrentía y sedimentos debido en parte al agotamiento de sedimento disponible, esto ocurre posteriormente a eventos de lluvia muy intensos. Este fenómeno de acorazamiento o agotamiento de sedimento ha sido señalado como una desventaja en la monitorización a largo plazo de parcelas cerradas (Romero_Díaz *et al.*, 1999; Ollesch y Vacca, 2002; Boix-Fayos *et al.*, 2006 y 2007), aunque es un fenómeno que también puede afectar a parcelas abiertas durante ciertos períodos. En muchos de estos casos el proceso de movilización de sedimento pasa de estar limitado por el transporte (*transported-limited*) a estar limitado por la disponibilidad (*detachment-limited*). En las parcelas de BE, este fenómeno es más difícil de detectar (Figura 6.5a) puesto que la cantidad de sedimento disponible es siempre muy elevada, mientras que en la parcela CC6 se observa una clara secuencia de agotamiento de la disponibilidad de sedimento (Figura 6.5b).

Para el establecimiento de umbrales de escorrentía y movilización de sedimentos, son útiles las parcelas con una buena cobertura vegetal, puesto que éstas responden únicamente a eventos extremos. Las parcelas BE3, BE4 y BE5 (Figura 6.5a) cumplen esta condición para el caso de Benidorm. La parcela BE3, cuyo colector se encuentra a escasos 10 cm aguas abajo de una gran macolla de esparto, únicamente ha recogido una cantidad significativa de escorrentía en cuatro ocasiones. Estos cuatro eventos se caracterizaron por un elevado tiempo de concentración de la lluvia (más del 50% del total de la precipitación del intervalo de medida corresponde a un único chaparrón). Y la escorrentía en la parcela BE3 fue hasta tal punto importante en estos cuatro eventos que han supuesto el 40% de la escorrentía recogida en todas las parcelas de la ladera y el 78% del total de sedimentos movilizados en la ladera en todo el periodo.

Los 16 eventos en los que la escorrentía en la parcela CC5 alcanzó unos valores significativos, correspondieron al 61% del total de la escorrentía y el 35% del total de sedimento recogidos en el conjunto de todas las parcelas y todo el periodo.

Observando la evolución temporal de las tasas de movilización de sedimentos en ambas zonas de estudio, fue especialmente significativo en el caso de Cocoll el bajo porcentaje de sedimentos totales como respuesta a eventos extremos. Esto pudo ser debido al agotamiento en la disponibilidad de sedimento en el momento en que se produjeron este tipo de eventos. En las condiciones climáticas de Cocoll es frecuente que los eventos extremos estén precedidos por otros de menor relevancia que aunque no generaron escorrentía en las parcelas protegidas sí movilizaron sedimentos disponibles en las parcelas desnudas.

En aquellas parcelas de Cocoll con mayores tasas de erosión, la relación escorrentía-sedimentos en la fracción fina, muestra tres tipos de situaciones una vez sobrepasada una cierta magnitud. Por una parte, unos pocos eventos tienen un incremento lineal en ambas variables, escorrentía y sedimentos. Por otra parte hay eventos con un escaso incremento de la escorrentía pero elevado en la movilización de sedimentos. Por último, un incremento en la escorrentía pudo aparecer sin un incremento significativo en los sedimentos. Estas dos últimas situaciones están relacionadas con la disponibilidad y agotamiento de sedimento respectivamente. En Benidorm es más frecuente una respuesta lineal en las parcelas vegetadas y una respuesta exponencial en las de menor cobertura. En

este último caso el desarrollo de una costra mineral mantiene una baja remoción de sedimentos hasta ciertos umbrales de precipitación, pero cuando estos son sobrepasados se produce un crecimiento brusco de la exportación de sedimentos (Figura 6.5).

6.6 DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Considerando que BE es representativa de las condiciones Mediterráneas semiáridas y CC de las condiciones Mediterráneas subhúmedas desde el punto de vista climático, pero que especialmente Cocoll ha sufrido un procesos de degradación importante de los suelos y la vegetación, aparecen claras diferencias entre ambos lugares, tanto en la producción de escorrentía, como de sedimentos.

Las precipitaciones son mucho más escasas en el área de BE y se caracterizaron por una menor duración y mayor intensidad de las tormentas, en los intervalos pequeños (I10-máx. mayor que en CC). Estas características dan lugar a unas mayores tasas de transporte de sedimento. Las propiedades del suelo y las características de los componentes superficiales juegan un papel muy relevante en el arranque y transporte de sedimento, así como en la producción de escorrentía. Estos factores no siempre se comportan en el mismo sentido (i.e. el papel ambivalente de la cubierta de piedras o fragmentos rocosos). En el período estudiado las tasas de escorrentía fueron similares en ambos sitios (416 y 414 l m⁻¹, en BE y CC respectivamente), aunque la producción de sedimento fue mucho mayor en BE (8.3 veces, 2733 g m⁻¹ en BE frente a los 330 g m⁻¹ en CC).

Así, en CC se registraron menores concentraciones de sedimento a pesar de la ocurrencia de eventos de mayor relevancia, aunque en un contexto de mayor porcentaje de cubierta vegetal, mayor disponibilidad de materia orgánica (Boix-Fayos *et al.*, 1998, 2001), agregados de menor tamaño y más estables, capacidad de infiltración más alta y mayor eficiencia de la cubierta de piedras protegiendo la superficie del suelo. Sin embargo en BE, mayor proporción de suelo desnudo, agregados más grandes y menos estables, tasas de infiltración más bajas y una cubierta vegetal más escasa, dieron lugar a tasas de concentración de sedimentos más elevadas así como una respuesta más rápida a la precipitación.

Los mecanismos de generación de escorrentía, analizados en Calvo-Cases *et al.*, 2003, fueron similares en ambos sitios. Sin embargo, la mayor frecuencia de situaciones en las que se sobrepasaron los umbrales de precipitación necesarios en CC, permitieron concluir que en esta zona predomina el *modelo de escorrentía mixto discontinuo* (Calvo-Cases *et al.*, 2003), que consiste en una combinación de áreas con flujo superficial Hortoniano y flujo por exceso de saturación. En contraste, en BE raramente la duración de la precipitación ha excedido el umbral necesario para que se saturen las áreas receptoras de escorrentía, por lo que en la mayoría de ocasiones la ladera respondió siguiendo un *modelo de escorrentía Hortoniano discontinuo*, en el que la escorrentía generada en las zonas desnudas y pedregosas se re-infiltró en el suelo bajo planta (fundamentalmente *Stipa tenacissima*). La parcela BE3 se considera un ejemplo de la ocurrencia del mecanismo de flujo superficial por *exceso de saturación* de alguna parte de la ladera en situaciones de eventos extremos. Las cuatro ocasiones en las que la parcela generó escorrentía coinciden con los cuatro eventos máximos obtenidos en el registro de precipitaciones. Se puede considerar que un valor de 50 mm de

precipitación en un chaparrón continuo y de elevada intensidad, es suficiente para cambiar el mecanismo de generación de escorrentía, de hortoniano a exceso de saturación. Todo ello podría dar lugar a un incremento de la continuidad espacial de la escorrentía y como consecuencia un significativo aumento de las tasas de transporte de sedimento.

El tamaño de los parches, en el sentido de la pendiente, que contribuyen a la producción de sedimento es mayor en la zona semi-árida (BE, entorno a 1 m) con respecto a la subhúmeda (CC, 10 cm). Este resultado coincide con Lavee *et al.*, (1998) quienes exponen que, en el contexto de condiciones ambientales del Mediterráneo, el tamaño de las áreas contribuyentes de escorrentía y sedimentos a escala de ladera se incrementa progresivamente desde las condiciones húmedas hacia las condiciones más áridas. Además, nuestros resultados apuntan hacia un mayor control del factor biológico (vegetación, hojarasca) en Cocoll. Sin embargo, cuando nos movemos hacia condiciones más secas, los factores abióticos tienen una mayor relevancia en el control de la generación de escorrentía y producción de sedimentos, lo cual está de acuerdo con el trabajo llevado a cabo en Israel (Lavee *et al.*, 1998). En realidad la zona de BE representa una situación de transición entre las condiciones húmedas y áridas, en la que aun adquieren relevancia la vegetación y la actividad biológica en el suelo, aunque es apreciable en los datos un incremento del papel jugado por las cubiertas de fragmentos rocosos y costras mecánicas sobre los procesos involucrados.

En ambas áreas de estudio los parches desnudos de vegetación se caracterizan por su elevada pedregosidad (38.1% en BE y 27.1% en CC). En BE, estas piedras se encontraban muy sueltas sobre la superficie, mientras que en CC, al presentar una matriz de suelo menos densa, las piedras se encontraban ligeramente embebidas en el suelo (tan sólo algunos milímetros); pero no del modo que habitualmente se entiende por embebidas, pues son piedras en superficie alrededor de las cuales se ha expandido el suelo, en muchas ocasiones por las heladas. Como consecuencia de ello existe una mayor movilidad de fragmentos rocosos durante los eventos de lluvia en BE que en CC. En la serie de datos, la fracción gruesa de sedimentos colectados en BE es 12.2 veces superior a la de CC: una proporción significativamente superior a las diferencias específicas de disponibilidad, que se ha visto son equiparables.

La pedregosidad además de movilizarse por gravedad o por medio de la escorrentía, puede formar parte de una capa de blindaje superficial que incrementa o reduce la actividad de ciertos procesos y que ha sido descrita en varias ocasiones (Kirkby *et al.*, 1998; Kirkby, 2002). Normalmente sucede cuando los fragmentos rocosos se encuentran parcialmente embebidos en el suelo, de manera que contribuyen al incremento de la escorrentía y transporte de sedimento (Poesen y Lavee, 1994). En nuestras áreas de estudio y durante el período de observación la pedregosidad de la superficie del suelo pareció jugar un doble papel. En CC, con unos fragmentos rocosos ligeramente embebidos, se pudo observar un efecto positivo en la reducción de la remoción de sedimento, tal y como muestran las correlaciones bajas y negativas (Figura 6.4). En contraste, en la zona de BE los fragmentos rocosos sobre la superficie, aunque esta vez en condiciones de elevada movilidad, se relacionaron positivamente con la producción de sedimento. El desarrollo de una costra mineral superficial y una elevada pedregosidad en la superficie del suelo, unido a un promedio alto del tamaño de agregados con baja estabilidad en condiciones de suelo seco (Boix-Fayos *et al.*, 2001), produce una mayor

concentración de sedimentos en la escorrentía en el área semiárida de BE comparada con la zona subhúmeda de CC.

En lo referente a la conexión de los resultados obtenidos en este capítulo en relación al resto de secciones de la tesis, en primer lugar resaltar que **se constata el efecto modulador de los CSS en la respuesta**, lo cual es la hipótesis básica de la presente tesis. Este hecho se evidencia a partir de los *cambios temporales en las relaciones precipitación vs. escorrentía y movilización de sedimento* (apartado 6.4), los cuales siempre atienden a modificaciones en la cobertura de CSS en las proximidades del colector. Esta dinámica de cambio de las formas (cobertura de CSS) y los procesos (escorrentía y sedimentos) se interpreta como un fenómeno de evolución natural en la que los diferentes ciclos de retroalimentación *in situ* (Puigdefàbregas, 2005), junto con las dinámicas generales de funcionamiento a la escala de ladera (conexión entre sus diferentes partes y balance hidro-sedimentario), promueven *estados transicionales* de los patrones de CSS para en conjunto reajustarse. En este sentido, Sánchez y Puigdefàbregas (1994) logran modelizar la dinámica de crecimiento, evolución y migración de las macollas de esparto en función de la dinámica hidro-sedimentaria en laderas de fuerte pendiente, demostrando por tanto una relación de interdependencia. Esto tiene un claro efecto en la **consideración de los patrones de distribución espacial de CSS como una manifestación dinámica**, y no estática, de reajuste de los balances a escala de ladera, lo cual tiene trascendencia en la interpretación de los resultados del capítulo 4 de análisis de patrones de distribución de CSS.

En segundo lugar, de los resultados de este capítulo se obtienen las dinámicas de respuesta de la escorrentía y movilización de sedimento (apartado 6.2) en ambas zonas de estudio, representativas del ambiente sub-húmedo y semiárido, en condiciones de lluvia natural en un amplio rango de eventos de precipitación por la larga serie de datos de que se dispone. Esto proporciona conocimiento sobre los diferentes **umbrales de respuesta**, especialmente relevante en estos sistemas de funcionamiento no-lineal, y que tiene su aplicación directa en el capítulo 7 de modelización de la escorrentía a escala de ladera sirviendo para el calibrado del modelo. La posibilidad de incorporar estos umbrales de respuesta en el modelo es fundamental para el salto de escala, desde la respuesta a nivel de parche, incorporada mediante los *hidrogramas tipo* (capítulo 5) hasta la de ladera, pues incorpora las *reglas de funcionamiento* de cada ladera en cuestión, en este caso, referidas a la capacidad de almacenamiento de agua en el suelo.

Por último, el apartado 6.3 de este capítulo que hace referencia al diferente alcance de las interrelaciones entre CSS en términos de distancias según la zona de estudio, sienta las bases para la interpretación de los resultados obtenidos en el modelo de simulación de la escorrentía en el siguiente capítulo 7 en términos de *recorrido efectivo* de la escorrentía en cada uno de los subambientes.

CAPÍTULO 7

RESPUESTA HIDROLÓGICA A ESCALA DE LADERA: MODELIZACIÓN Y PAPEL DE LOS PATRONES DE COMPONENTES SUPERFICIALES DEL SUELO (CSS)

La respuesta hidrológica en ambientes mediterráneos, más allá de la escala de micro-parcela, sigue un **comportamiento complejo y no-lineal** del que todavía no se comprenden bien los mecanismos que lo regulan. Existe un amplio consenso en atribuir este comportamiento a la heterogeneidad espacial, más concretamente a la configuración en mosaico de fuentes y-sumideros hidrológicos.

Asumiendo que la heterogeneidad de la respuesta hidrológica es **modulada por los CSS**, ya que éstos influyen en la capacidad de infiltración y, que en estas laderas con suelos poco desarrollados o degradados pueden relacionarse con la capacidad de almacenamiento de agua, este capítulo trata de reproducir la integración espacial de los CSS en el *continuum* ladera para analizar su impacto en la respuesta hidrológica a esta escala.

La no linealidad de la respuesta hidrológica en ambientes mediterráneos está relacionada con la presencia de umbrales de respuesta (Schumm, 1979; Brunsden y Thornes, 1979) dentro de los modelos generales hidro-geomorfológicos.

Uno de los modelos hidrológicos conceptuales descritos a escala de ladera en ambiente mediterráneo es el **modelo mixto** (Calvo-Cases *et al.*, 2003). En él se describe cómo tras pasado cierto umbral de almacenamiento de agua en el suelo, el mecanismo de generación de escorrentía *hortoniano* aparece combinado con el de *exceso de saturación* en la misma ladera. Este funcionamiento se ha corroborado en condiciones de lluvia natural (Calvo-Cases *et al.*, 2005) pero todavía no existe un conocimiento íntegro de los factores que lo controlan ni de su manifestación espacial, como tampoco de su relación con los patrones de distribución CSS a lo largo de la ladera.

Al mismo tiempo, la **saturación del suelo** es una cuestión compleja de abordar, no sólo por la propia redistribución del agua, si no también por la gran heterogeneidad de los suelos, tanto en su profundidad y como en las capacidades de almacenamiento de agua. A este respecto utilizamos el término de **capacidad de almacenamiento efectivo**, para designar un umbral de llenado de agua en el suelo, que sin alcanzar la completa saturación del perfil, sí produce un cambio en el régimen de respuesta a la infiltración, sin entrar aquí en los mecanismos y subprocesos que lo desencadenan, pero que responde a una evidencia observada en los datos de las parcelas de campo bajo condiciones de lluvia natural. El **flujo lateral subsuperficial** es otro elemento que añade complejidad

al funcionamiento del sistema, y que normalmente no se considera por cuestiones de dificultad en su medición y cuantificación, tendiendo a la simplificación en el análisis, siendo finalmente la componente más inexplorada y desconocida, a pesar de que intervenga en la redistribución del agua a lo largo del transecto longitudinal con repercusiones en la escorrentía superficial.

Para alcanzar el objetivo de investigación relacionado con este capítulo (objetivo 4, Tabla 1.1) se estudiaron los patrones de distribución de la escorrentía y conectividad, identificando umbrales que corresponden al funcionamiento no-lineal comentando arriba. Todo ello se realizó por medio del desarrollo de un modelo hidrológico explicado en la sección 3.4 de la metodología.

Para corroborar que las condiciones de superación de las capacidades de almacenamiento *efectivo* del suelo son las desencadenantes del comportamiento no-lineal sujeto a umbrales, se probaron dos escenarios de simulación simplificados respecto de los límites de *llenado efectivo* de agua en el suelo (Figura 3.4.5). Los dos escenarios fueron:

1. Escenario 1 (modelo hortoniano). Los suelos generan escorrentía siguiendo una máxima capacidad de infiltración
2. Escenario 2 (modelo mixto). Los suelos generan escorrentía cuando cada parche individual (con sus CSS) supera su *capacidad de almacenamiento efectivo* de agua y comienza a comportarse de manera análoga a unas condiciones de saturación del suelo.

Se aplicaron a las áreas que drenan a las parcelas de campo para así poder validar con datos reales de respuesta. Cuando se corroboró la hipótesis de un modelo mixto de respuesta se aplicó posteriormente a los transectos completos de ladera.

El escenario con **límites de llenado efectivo se calibró** en base a los resultados obtenidos del análisis de la respuesta en las parcelas GERLACH para todo el periodo, fijándose umbrales diferentes de disparo de la respuesta según el tipo predominante de parcela, vegetada o desnuda (Figura 7.1; Tabla 7.1). Éstos se atribuyeron a diferentes momentos de *llenado efectivo* del suelo, variables según sus capacidades de almacenamiento de agua, resultando siempre superior en las parcelas vegetadas debido a su relativo mayor espesor de suelo y condiciones de estructura y porosidad frente a las parcelas con suelo predominantemente desnudo.

Si bien estos umbrales empíricos se refieren a magnitud de precipitación, en la rutina de simulación se introdujeron como límites a la infiltración, ello introdujo un factor de error que subestima las capacidades de almacenamiento de agua, lo cual debe tenerse en cuenta en la interpretación de los resultados. El nivel de incertidumbre hacia un valor de capacidad de almacenamiento próximo a la realidad es mayor para el caso de las superficies vegetadas, pues los aportes de escorrentía suplementarios a la precipitación directa son mayores que en el caso de las superficies desnudas, más aún cuando es un umbral que se produce con posterioridad al *llenado* de las no-vegetadas. Incrementándose así el desfase precipitación-infiltración y por tanto habiendo una mayor subestimación de la capacidad de almacenamiento promedio.

Tabla 7.1 Parámetros de entrada del modelo de simulación para cada CSS y área de estudio: (i) *hidrogramas tipo* y (ii) límites de llenado del suelo para la calibración de los dos modelos de respuesta.

CSS	Hidrogramas tipo									Modelo de respuesta			
	Po			α			Fc			Hortoniano		Mixto	
	BES	BEN	CCS	BES	BEN	CCS	BES	BEN	CCS	BES-BEN-CCS	BES	BEN	CCS
ROCA	0.83	0.83	0.83	0.094	0.094	0.094	4.18	4.18	4.18	0	5	5	5
FR 70em	3.00			0.010			29.58			0	40		
FR 50em	2.71	3.55		0.005	0.005		30.72	39.16		0	40		40
FR 25em	1.27	1.49		0.005	0.005		31.86	40.30		0	40		40
FR 70su	5.59	7.68	7.96	0.025	0.025	0.015	35.29	43.73	51.19	0	40	40	50
FR 50su	3.29	4.38		0.006	0.006		34.14	42.58		0	40		40
FR 25su	1.39	1.65	1.69	0.005	0.005	0.002	33.00	41.44	43.69	0	40	40	50
PLMTA	9.51	0.43	20.00	0.113	0.002	0.028	53.99	11.68	15.21	0	40	40	150
STIPA	3.45	3.45		0.034	0.034		54.64	54.64		0	80	80	
HERBA	9.51	9.51	9.51	0.113	0.113	0.113	53.99	53.99	53.99	0	80	80	150
ARBUS	13.63	13.63	13.63	0.005	0.005	0.005	53.98	53.98	53.98	0	80	80	150
PINO	13.63	13.63		0.005	0.005		53.98	53.98		0	80		80

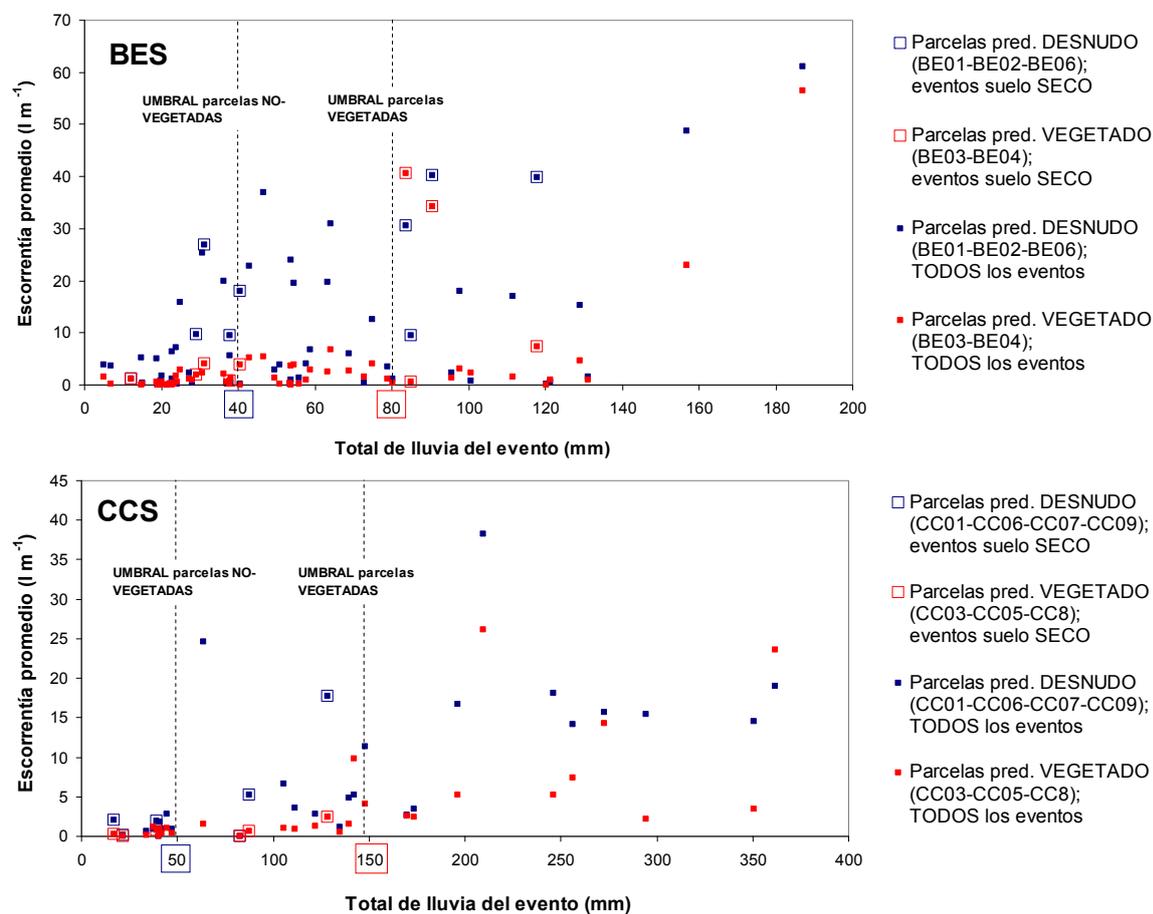


Figura 7.1 Umbrales de respuesta de las parcelas GERLACH clasificadas en vegetadas y desnudas según su predominio de cobertura en la proximidad del colector. Se calcula el promedio de escorrentía por tipo de parcela, Se presentan los resultados para todos los eventos del periodo y para únicamente los eventos bajo condiciones iniciales de suelo seco.

Nos planteamos confirmar que la hipótesis de funcionamiento del *modelo mixto* de generación de escorrentía a lo largo de los eventos de magnitud e intensidad suficientes, son la fuente principal de no-linealidad de la respuesta y regido por los contrastes en las capacidades de almacenamiento de agua en el suelo. Después se analizó en general las fases de respuesta intentando explicar los mecanismos que la controlan durante el evento y sus repercusiones en la configuración espacial de la escorrentía. Posteriormente se describieron de manera detallada las diferentes manifestaciones espaciales del fenómeno en las tres laderas de estudio. El propósito fue ahondar en las propiedades de los patrones de distribución de CCS que afectan a la conectividad de la escorrentía a lo largo de todo el transecto.

7.1 CONFIRMACIÓN DEL MODELO MIXTO DE GENERACIÓN DE ESCORRENTÍA EN BASE A RESULTADOS DE LAS PARCELAS EN CONDICIONES DE LLUVIA NATURAL

Los resultados de la aplicación de los dos escenarios del modelo confrontados con la respuesta bajo condiciones de lluvia natural que producen las parcelas de campo, se acercan más al comportamiento del escenario 2 (Figuras 7.3 y 7.4), que correspondería a un modelo de generación de escorrentía mixto), que al escenario 1 (Figura 7.2), el cual presenta una respuesta lineal a lo largo de todo el evento de simulación y unas mínimas tasas de escorrentía en todas las parcelas y ambas áreas de estudio.

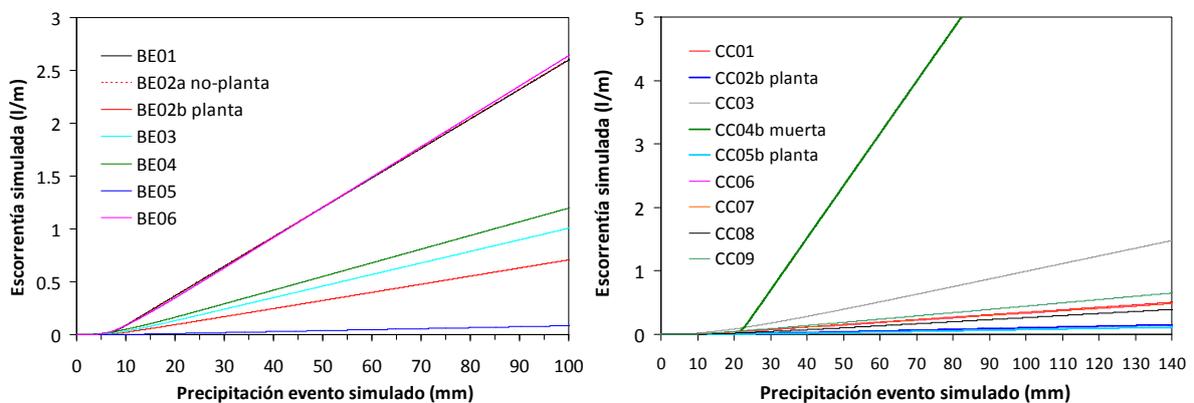


Figura 7.2. Resultados de la simulación del escenario control correspondiente a un comportamiento de modelo *hortoniano* puro sin límites a la capacidad de almacenamiento de agua en el suelo.

Se observa, así, una muy buena correspondencia en términos de umbrales y tendencias generales con el escenario 2, que incorpora límites de *llenado efectivo* (Figuras 7.3 y 7.4). Las curvas de la modelización muestran un incremento exponencial de la escorrentía en todas las parcelas una vez alcanzado un determinado umbral de precipitación. Esta trayectoria puede descomponerse en tres fases de respuesta, que de forma generalizada también se reproduce en las parcelas de campo (Figuras 7.3 y 7.4). Se parte de unos valores de escorrentía muy bajos cuya progresión es lineal, hasta que se llega a un primer umbral de incremento moderado de la escorrentía, aunque de duración variable según parcela. Y es en el segundo umbral donde se dispara definitivamente la respuesta.

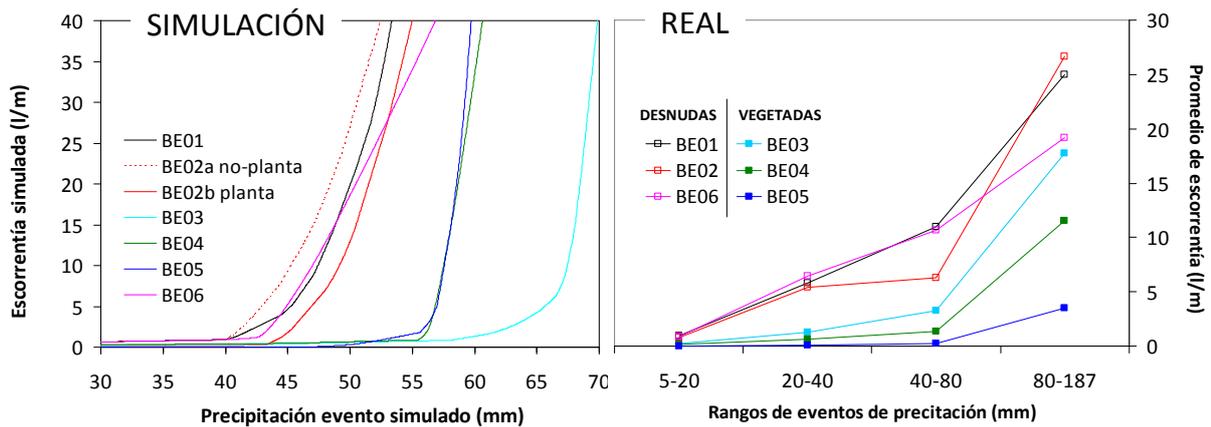


Figura 7.3. Resultados de la simulación del escenario 2 con límites a la *capacidad de almacenamiento efectivo* de agua en el suelo contrastados con la respuesta real de las parcelas Gerlach en diferentes rangos de magnitud de precipitación para el área de BES.

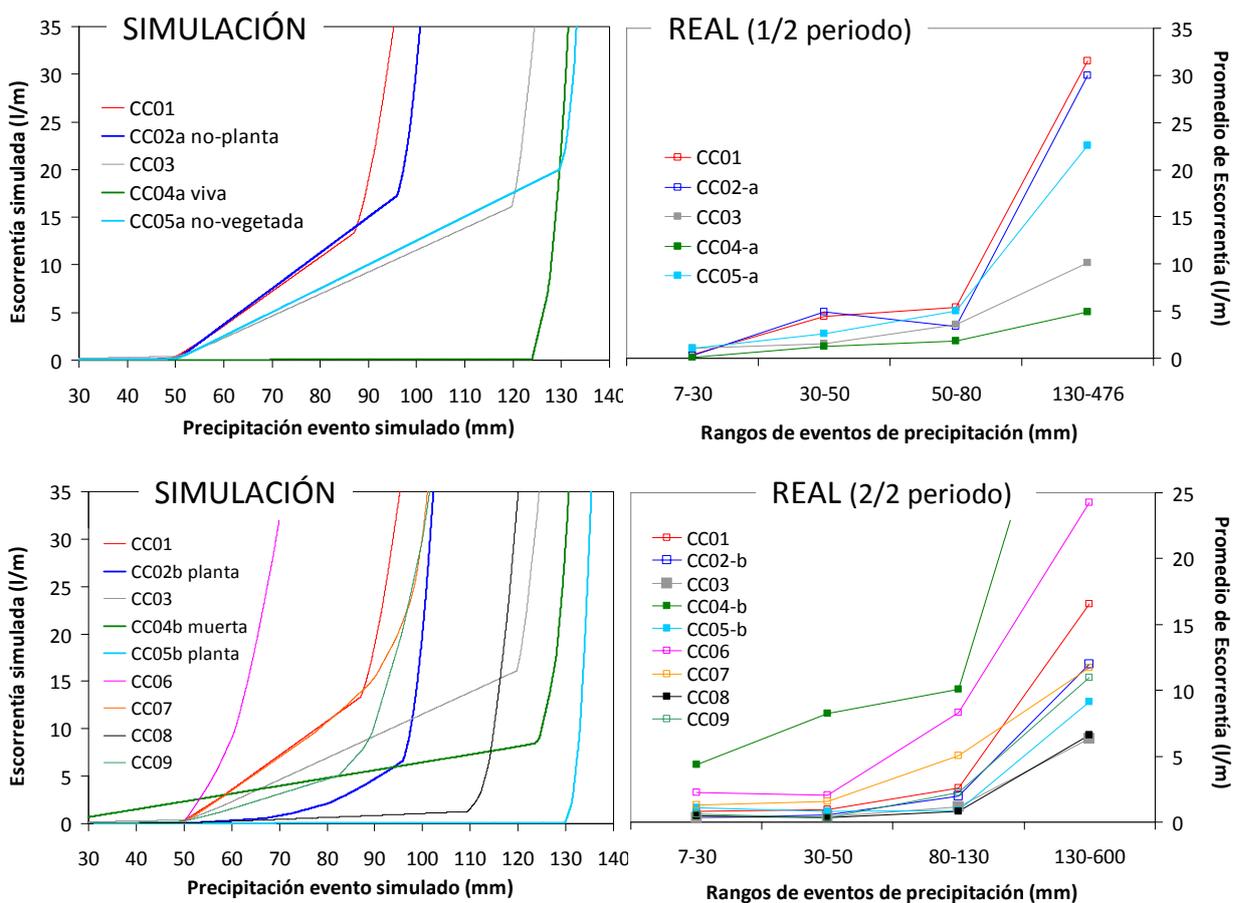


Figura 7.4. Resultados de la simulación del escenario de *modelo mixto* con límites a la *capacidad de almacenamiento efectivo* de agua en el suelo contrastados con la respuesta real de las parcelas Gerlach en diferentes rangos de magnitud de precipitación para el área de CCS.

Otra similitud con la respuesta real está en los órdenes de **magnitud de la escorrentía**, con la salvedad de que la modelización muestra en la última fase una progresión exponencial del flujo a medida que continúa el evento de precipitación, sobrepasando pronto los valores registrados en el rango de eventos reales donde el incremento es más moderado (Figuras 7.3 y 7.4). Debe tenerse en cuenta que aquí no están considerados los flujos laterales y de percolación a nivel subsuperficial, los cuales moderarían las tasas de escorrentía superficial al drenar el suelo y permitir algún grado de infiltración generalizada. Además el segundo umbral de disparo de la escorrentía se produce en la modelización de forma más temprana en términos de precipitación. Esto se debe en buena medida a que, como ya se ha indicado anteriormente, los límites de *llenado efectivo* de las superficies vegetadas están infraestimados.

Pero el principal elemento que corrobora la utilidad de la modelización es la comparación de la propia **trayectoria de las parcelas** entre ellas y que pone de manifiesto la capacidad del modelo de discriminar la respuesta entre diferentes patrones de distribución a partir de la integración espacial de los CSS y de sus *hidrogramas tipo* individuales, al tiempo que evidencia sus principales limitaciones. En términos generales el modelo discrimina en ambas laderas entre las parcelas predominantemente vegetadas y desnudas al igual que sucede en la reales.

La ladera de **BES** (Figura 7.3) presenta casi una perfecta correspondencia entre las tres parcelas con predominio de superficies desnudas cerca del colector, incluso estando situadas en tramos de ladera distantes, la BE01 y BE02 en el sector II y la BE06 en el sector V. Las parcelas con predominio de vegetación, a pesar de mantenerse a la cola, siguen entre sí un orden inverso, con un marcado retardo de la parcela BE03 cuando con lluvia natural es la de respuesta más rápida. Estas tres parcelas pertenecen a sectores diferentes, por lo que algún factor no contemplado en el escenario de simulación podría estar influyendo.

Para el caso de **CCS** se presentan los datos subdivididos en dos períodos (Figura 7.4), delimitados por el momento de la instalación de las 4 nuevas parcelas (CC06, CC07, CC08, CC09). Para las que han experimentado un mayor cambio en su cobertura en las proximidades del colector (CC04 Y CC05) a lo largo de todo el periodo de medida se establece este límite temporal para simular las situaciones previa y posterior al cambio, intentando obtener una perspectiva en la evolución de la respuesta. A diferencia de BES, existe una óptima correspondencia a nivel general en las dos tipologías de parcela, encontrándose mayores divergencias respecto de la respuesta real precisamente en las parcelas donde se han detectado los cambios de cobertura.

En el primer periodo todas las parcelas a presentan una relación acorde con la realidad. Si bien la parcela CC04, que también está sometida al cambio, retrasa el comienzo de la escorrentía. En el segundo período también son las de dinámica cambiante las que mayor desajuste muestran. Este hecho se atribuye a que pese al cambio de los CSS a nivel aéreo (aparición de una nueva planta; agostamiento en otros casos) que conlleva la correspondiente modificación de la respuesta, todavía existe una inercia respecto de su comportamiento anterior. Esto se relaciona con una dinámica de evolución más lenta a nivel subsuperficial, hasta que se produzca un cambio significativo en las propiedades del suelo mediante los correspondientes ciclos de retroalimentación, de modo que la respuesta hidrológica se identifique plenamente con el CSS a nivel superficial. Se observan estas

respuestas ambivalentes en estado de transición en la parcela CC04 en el primer periodo, y las CC02 y CC05 en el segundo (Figura 7.4).

Destacamos la subestima del modelo en la magnitud de la respuesta de la parcela CC04 en el segundo periodo cuando la aliaga muere. En el Capítulo 4 se le reconocía a un individuo de aliaga muerta varios estadios de evolución de la respuesta asociada a la hidrofobia en función de los cambios fisionómicos que experimenta en su proceso de descomposición. Finalmente para la asignación del hidrograma tipo correspondiente se optó por la reconstrucción de una respuesta promedio con el propósito de abarcar todo el rango de estadios de evolución de la planta muerta en todo el transecto. Así pues, existen dos posibilidades de interpretación a la divergencia de la respuesta entre el modelo y la realidad: (i) por un lado que el proceso de descomposición de un individuo muerto sea muy rápido, y por tanto la hidrofobia se incrementa con mucha rapidez quedando esta situación más representada en los eventos registrados en ese periodo; (ii) se infravalorase en exceso las tasas de escorrentía promedio. En cualquier caso se acepta como válida en el sentido de que con el cambio de cobertura, el modelo consigue incrementar sustancialmente la respuesta.

7.2 MODELIZACIÓN DE LA ESCORRENTÍA A ESCALA DE LADERA SEGÚN EL ESCENARIO DE MODELO MIXTO (ESCENARIO 2): PATRONES TEMPORALES DE EVOLUCIÓN DE LA ESCORRENTÍA

El escenario propuesto hizo una **simplificación** de las capacidades de almacenamiento de agua en el suelo en base al binomio vegetación-suelo desnudo (Tabla 7.1), definidos a partir de datos empíricos de respuesta contrastada. No se estableció aquí ninguna diferencia entre sectores a lo largo del transecto sobre posibles diferencias en profundidad de suelo. Se realizó una simulación con el modelo de una duración 100 y 180 minutos en BE y CC respectivamente que equivalen a 91 y 165 mm de precipitación respectivamente.

La Figura 7.5 muestra las **secuencias de evolución de la infiltración y la escorrentía** a lo largo del evento simulado hasta que se alcanzó la estabilidad de la respuesta, correspondiendo con una situación donde ya se ha superado la *capacidad de almacenamiento efectivo* del suelo y con un coeficiente de escorrentía a lo largo de la ladera muy homogéneo, próximo a 1. Esta condición se alcanzó antes en las laderas de BE (hacia el minuto 100) en relación con la de CC (minuto 180).

Se seleccionaron para cada sitio diferentes **tiempos** característicos, según mostraron momentos de cambio significativos en el patrón de distribución de la escorrentía. Al igual que en los **intervalos de las leyendas** de infiltración y escorrentía para la salida cartográfica, que se establecieron bajo criterios de representatividad del proceso, y en los que hay un incremento en los órdenes de magnitud a medida que avanza el evento. Las magnitudes de la escorrentía (mm) se refieren al lapso de tiempo al que se distribuye la escorrentía en la rutina de simulación, ajustado a la velocidad a la que se establece el flujo y determinado por la resolución a la que se trabaja, y que en este caso es de 1/36 de minuto, función del tamaño de celdas y la velocidad de flujo, tal como se explica en metodología.

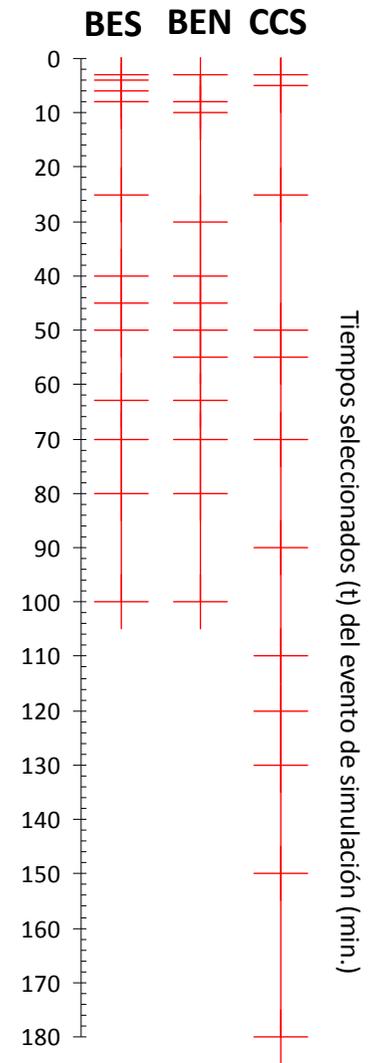
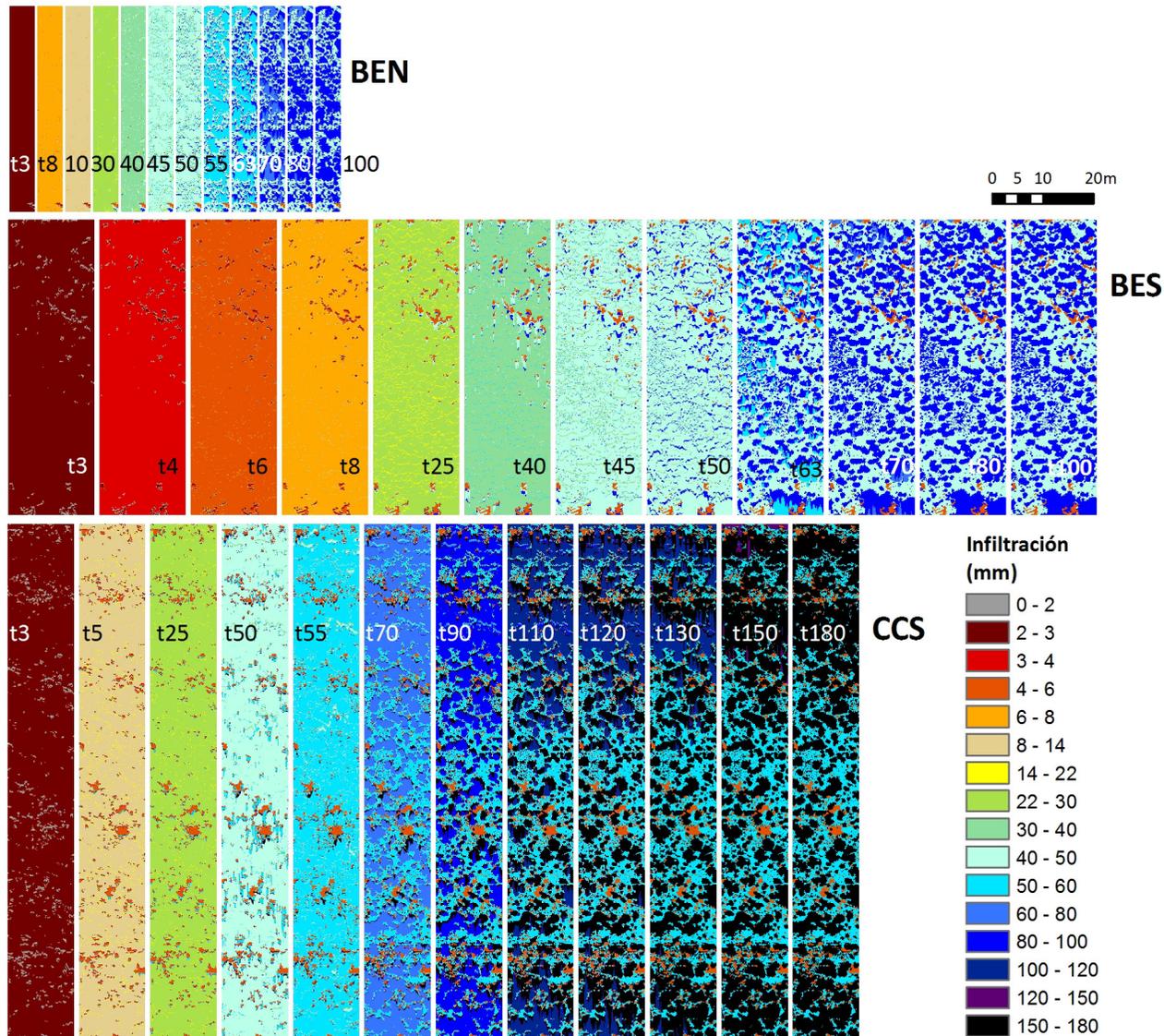


Figura 7.5a Mapas de la secuencia de evolución de la infiltración acumulada modelizada con el escenario 2. Visión general de todas las laderas.

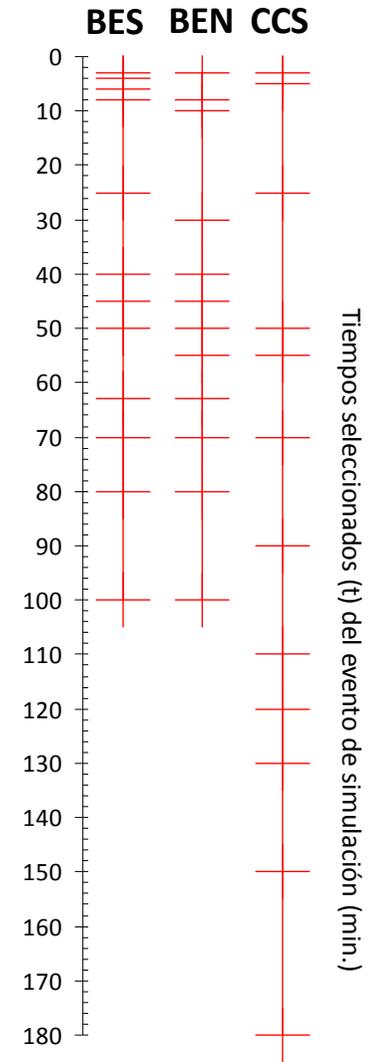
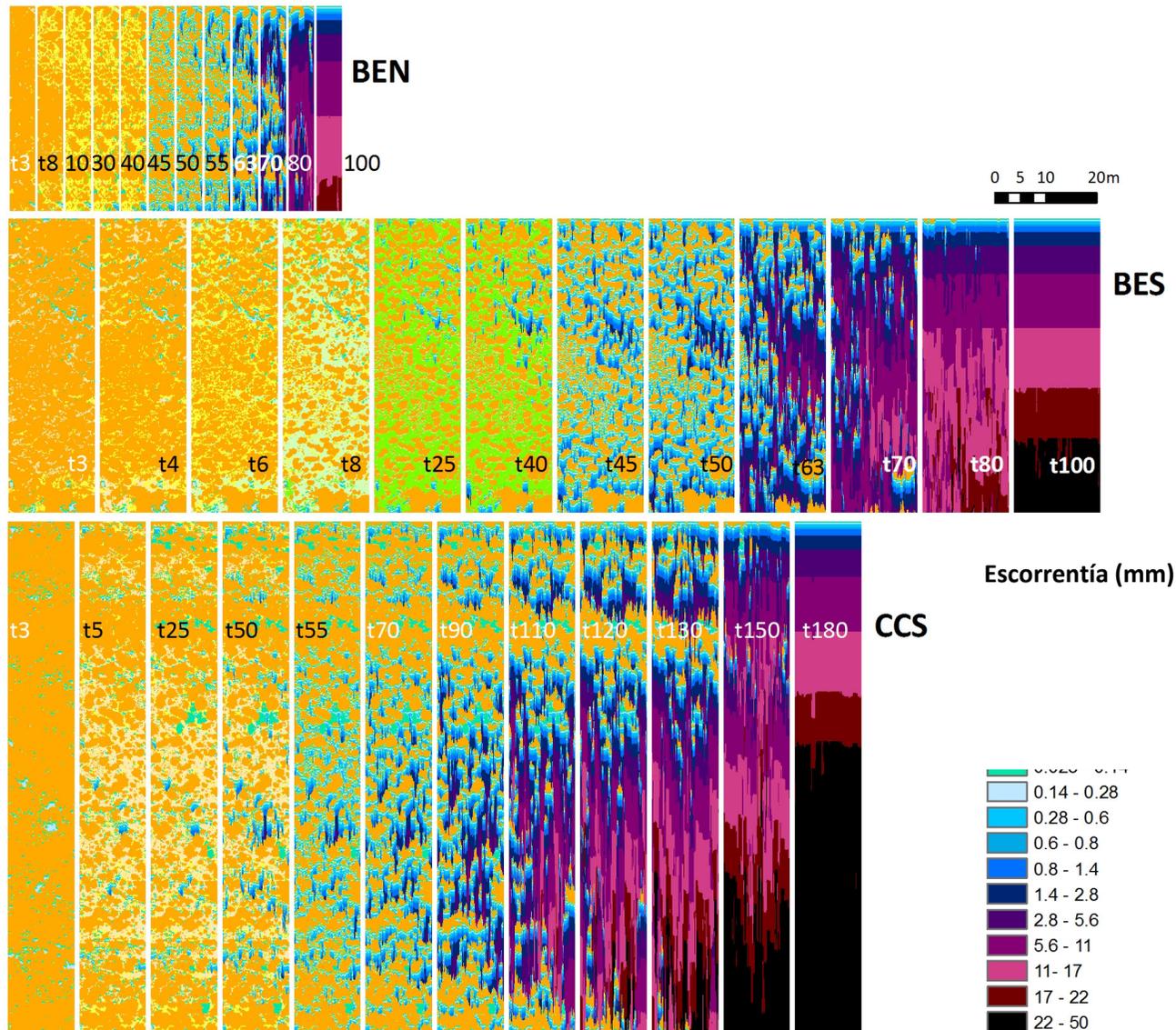


Figura 7.5b Mapas de la secuencia de evolución de la escorrentía instantánea modelizada con el escenario 2.

La primera diferencia que se observa entre laderas es la propia **temporización**, es decir los tiempos a los que se producen cambios significativos, y que atiende a velocidades diferentes de avance en los procesos en función de la respuesta y la secuenciación de los CSS. La ladera de BES es la más rápida seguida de cerca por BEN, mientras que CCS presenta una respuesta significativamente más lenta.

En lo referente a las **magnitudes**, son relevantes los valores que adquieren la infiltración y la escorrentía en los momentos de transición y en la fase final, y que en algún grado marca la temporización anteriormente descrita. Respecto de las magnitudes finales, CCS supera en infiltración al resto por las mayores capacidades de infiltración, mayor longitud del transecto y duración del evento hasta la estabilización del flujo (Figura 7.5).

Pero el contraste más significativo radicó en los cambio en la **conectividad** espacial de la escorrentía a lo largo de la ladera. Fue común para las tres laderas que la conexión comenzase en unas determinadas zonas puntuales desde donde luego continuó la expansión. Esto ocurre en condiciones donde se ha visto incrementado el flujo en superficie. Concretamente donde a partir de unos coeficientes elevados de escorrentía (afloramientos de roca) se ha podido configurar desde etapas muy tempranas un flujo continuo de longitud suficiente como para que la onda de escorrentía se amplifique con la distancia (t40, parte alta de la ladera BES; t50 parte media de la ladera CCS; t50 parte alta y baja de la ladera BEN). Las condiciones óptimas son que en su trayectoria encuentre una extensión suficiente de área desnuda y unos parches de vegetación limitados con escasa capacidad de contención del flujo. Este fenómeno se observa especialmente en las laderas de BES y CCS donde la conectividad se desencadena hacia las zonas centrales del transecto expandiéndose progresivamente aguas abajo.

7.2.1. Funcionamiento general del modelo mixto de escorrentía: umbrales de respuesta y mecanismos control

El detalle de la secuenciación de mapas de las tres laderas (Figura 7.6) permitió apreciar con mayor claridad los patrones espaciales generales de distribución de la infiltración y la escorrentía. Las distribuciones de frecuencia de escorrentía e infiltración (Figura 7.7) mostraron la superficie relativa ocupada por cada intervalo de magnitud en cada tiempo seleccionado, y discriminaron entre áreas desnudas y vegetadas, lo que permitió la interpretación de la información en base al binomio fuente-sumidero. Cada gráfico corresponde con un intervalo de la Figura 7.6. Los valores de escorrentía e infiltración en el perfil longitudinal de un segmento de la ladera BES (Figura 7.8) permitieron apreciar en detalle la progresión de ambas variables en el espacio y en el tiempo, con especial interés en mostrar su interdependencia, y cómo la integración espacial de los diferentes CSS, su *secuenciación espacial*, asociada a unos patrones de distribución determinados, son clave para comprender la respuesta hidrológica a escala de ladera.

Observando de manera conjunta las secuencias de infiltración y escorrentía (Figuras 7.6, 7.7 y 7.8) en el transcurso de la simulación se identificaron de **forma genérica** para todos los transectos **cuatro situaciones o fases consecutivas de respuesta**. Entre sitios varían la magnitud, la temporización y la

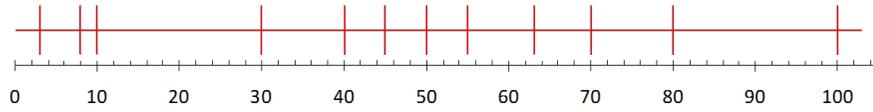
propia configuración de los patrones de escorrentía aunque se reconocieron la misma secuencia de mecanismos:

(i) La fase inicial (Figura 5.3.8 a y b), denominada **aparición de la escorrentía**, consistió en el paulatino incremento de superficies generadoras de escorrentía hasta la primera estabilización del patrón, que comenzando con pequeñas manchas inconexas muy dispersas (superficies de afloramientos rocosos fundamentalmente) que se multiplicaron y expandieron hasta culminar en el momento que se produjo una correspondencia entre toda el área fuente y la superficie desnuda, en una situación en la que todavía la toda la vegetación se comportó netamente como áreas sumidero (Figuras 7.6 y 7.7). En esta fase tan temprana dominó el **mecanismo hortoniano** de generación de escorrentía en las áreas dónde ésta llegó a generarse.

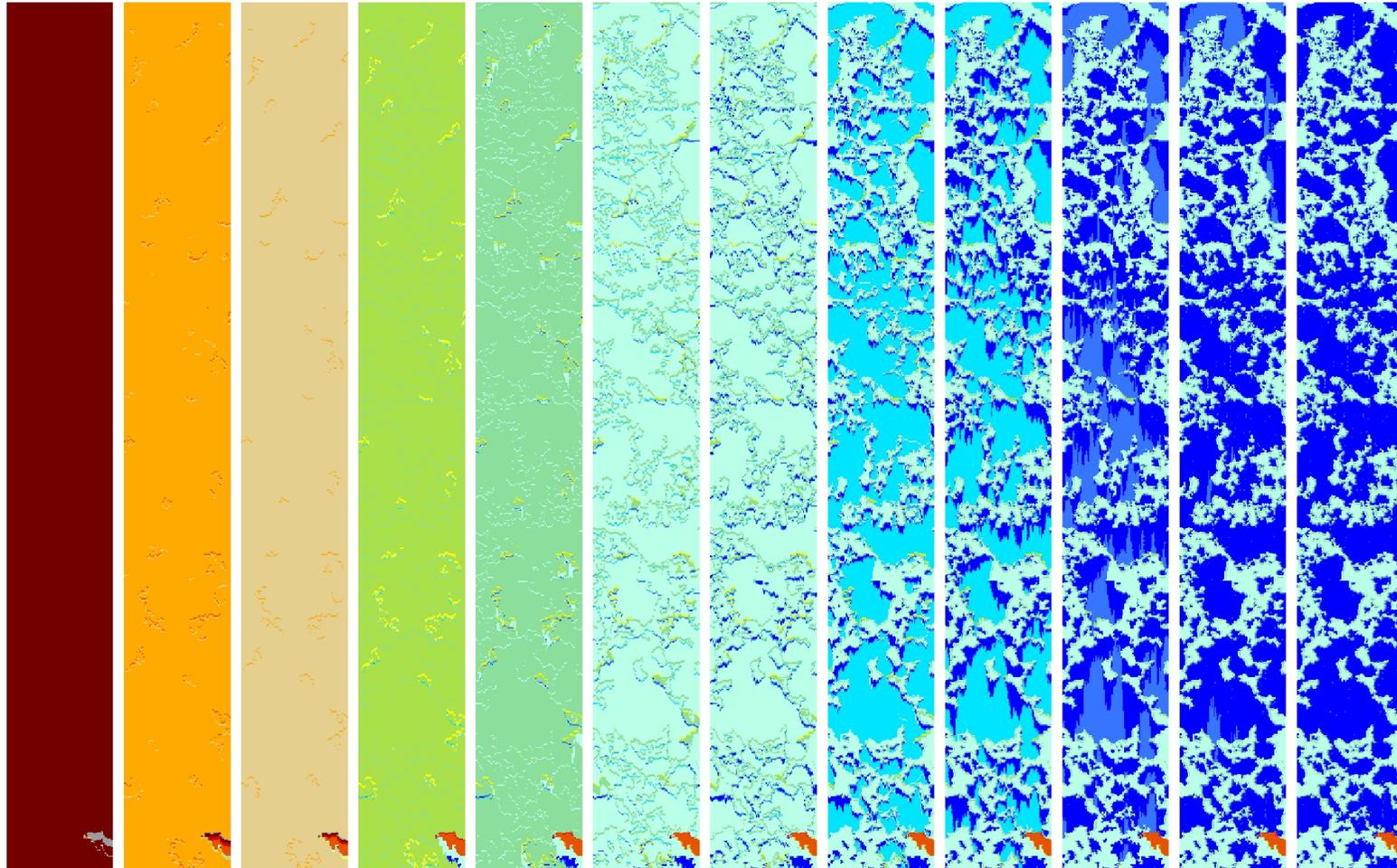
Las tasas de escorrentía oscilaron en un rango de magnitud muy bajo (Figura 7.8a), al tiempo que en los patrones de infiltración apenas se apreció contraste entre áreas vegetadas y desnudas a lo largo del transecto (Figura 7.6), a excepción de las inmediaciones de afloramientos rocosos. Aunque desde el punto de vista de la redistribución del agua en el perfil ya comienza a desarrollarse una diferenciación entre áreas vegetadas y desnudas, que se intensificó con el transcurso del evento (Figura 7.8b). Este contraste se produjo en los límites de contacto entre los parches vegetados y desnudos, comportándose de manera antagónica según fue aguas arriba o abajo de la vegetación, pero en ambos casos se debió al cambio brusco en los coeficientes de escorrentía. En los frentes aguas arriba de la vegetación se produjo un pico de incremento de la infiltración, con la consiguiente reducción de la escorrentía. Mientras que en el frente de contacto con el suelo desnudo aguas abajo se produjo el fenómeno inverso, la escorrentía se incrementó bruscamente hasta que se estabilizó, reflejándose en un rápido descenso de la infiltración hasta que recobró sus valores de partida. Esta situación inicial en BES tan sólo se mantuvo hasta el minuto t8, en BEN hasta el t10 y en CC esta situación perduró durante más tiempo, t25 (Figura 7.7).

(ii) La siguiente fase se caracterizó por mantenerse **invariable el patrón de mosaico fuente-sumidero** típico descrito para ambiente semiáridos, con su correspondencia con las áreas desnudas y vegetadas respectivamente (Figura 7.7). Fue la fase más estable desde el punto de vista de la configuración espacial de la escorrentía y de la conectividad superficial (Figura 7.6). Durante esta fase comenzaron a saturarse al menos los primeros centímetros de suelo desnudo y en algunos casos de suelos más profundos comenzaron a saturarse también a mayor profundidad en el perfil. (Figura 7.7). Así pues, esta fase ya se rigió por el **funcionamiento de modelo mixto** a partir de cierto umbral (Figura 7.7), donde se combinaron los dos mecanismos de generación de escorrentía, el *hortoniano* y el de *por exceso de saturación*, si bien este último de momento sólo restringido a las áreas desnudas, por lo que a esta fase podemos denominarla **modelo mixto en suelos desnudos**. Este umbral de comienzo de la saturación osciló entre el t50 y el t70 dependiendo de la ladera de estudio.

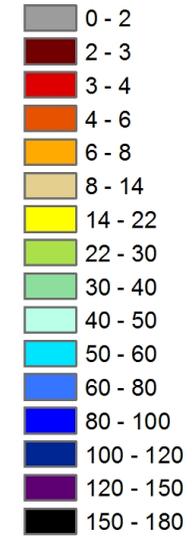
Tiempos (t) seleccionados (min.)



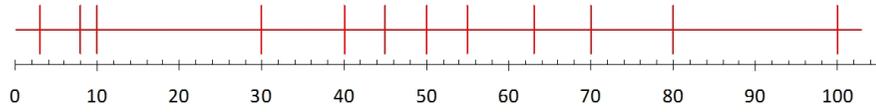
BEN



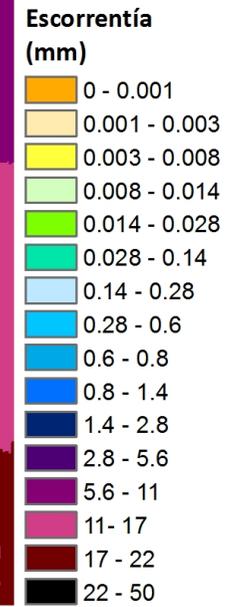
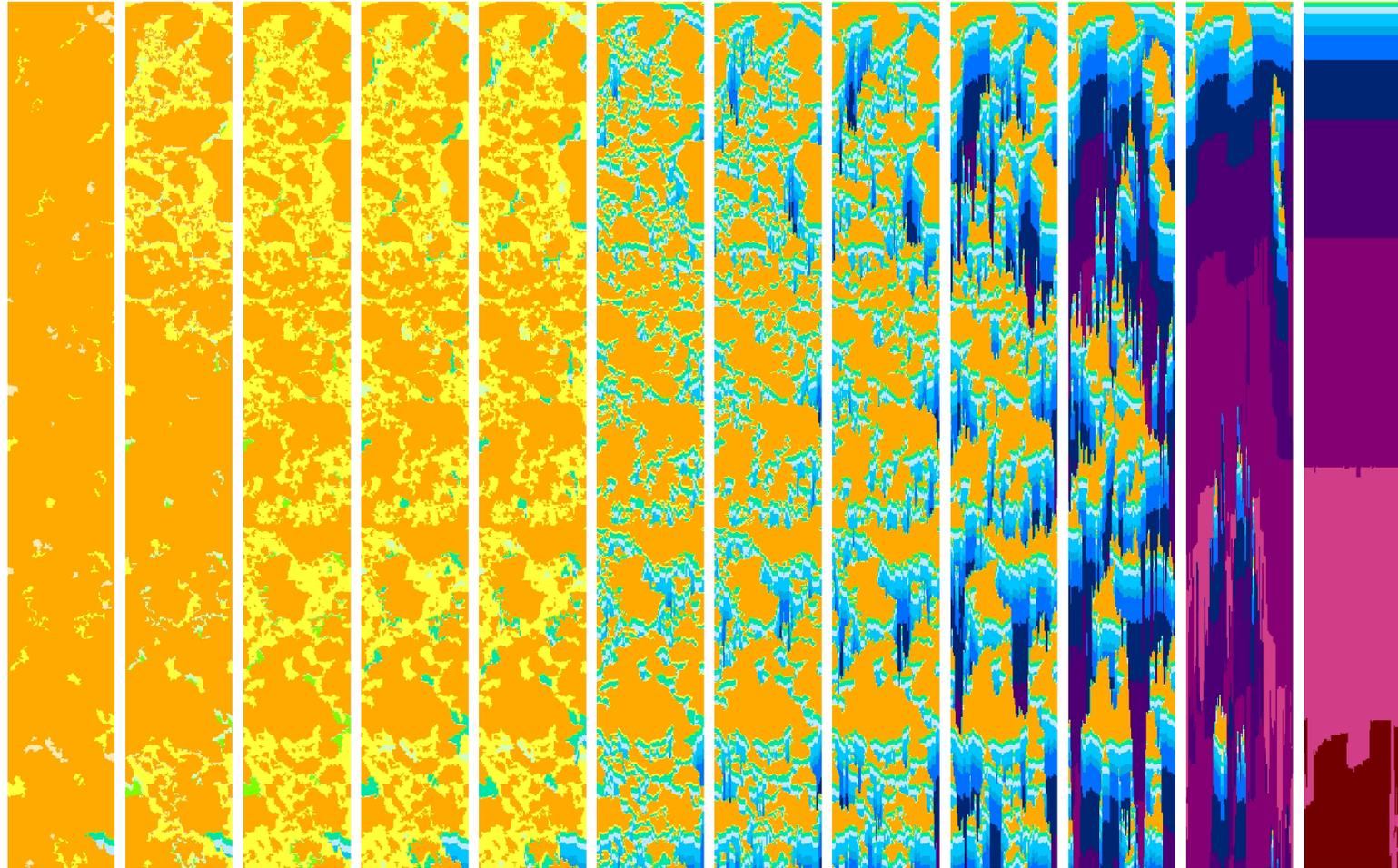
**Infiltración
(mm)**



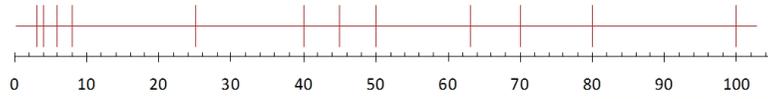
Tiempos (t) seleccionados (min.)



BEN

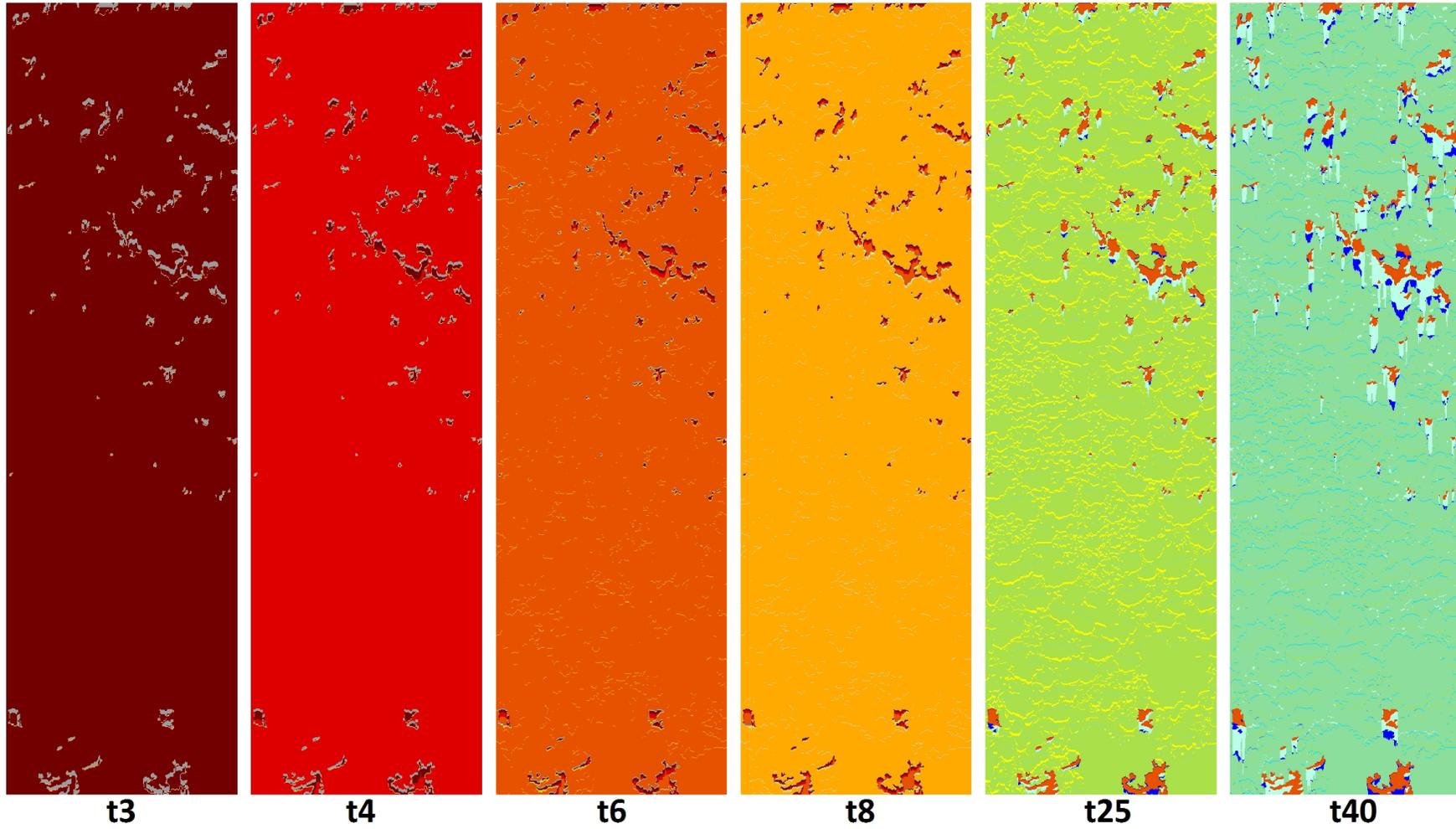


Tiempos (t) seleccionados (min.)



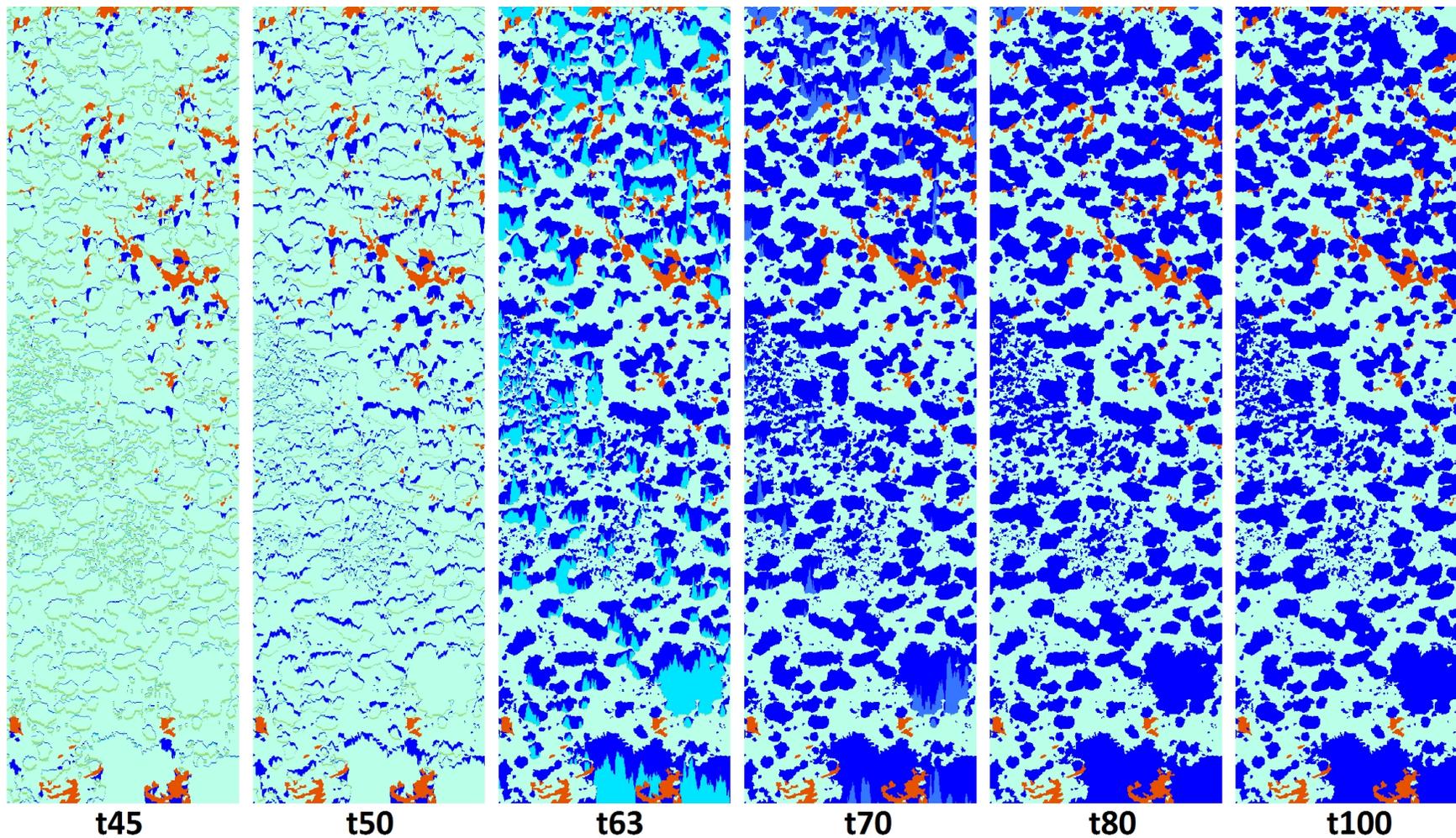
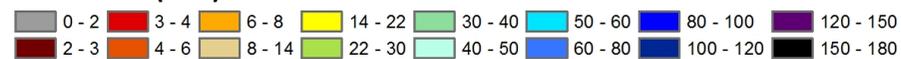
BES

Infiltración (mm)

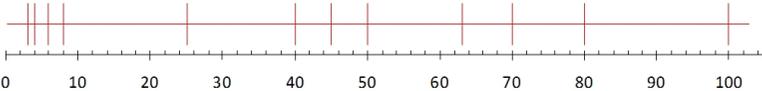


0 10m

Infiltración (mm)

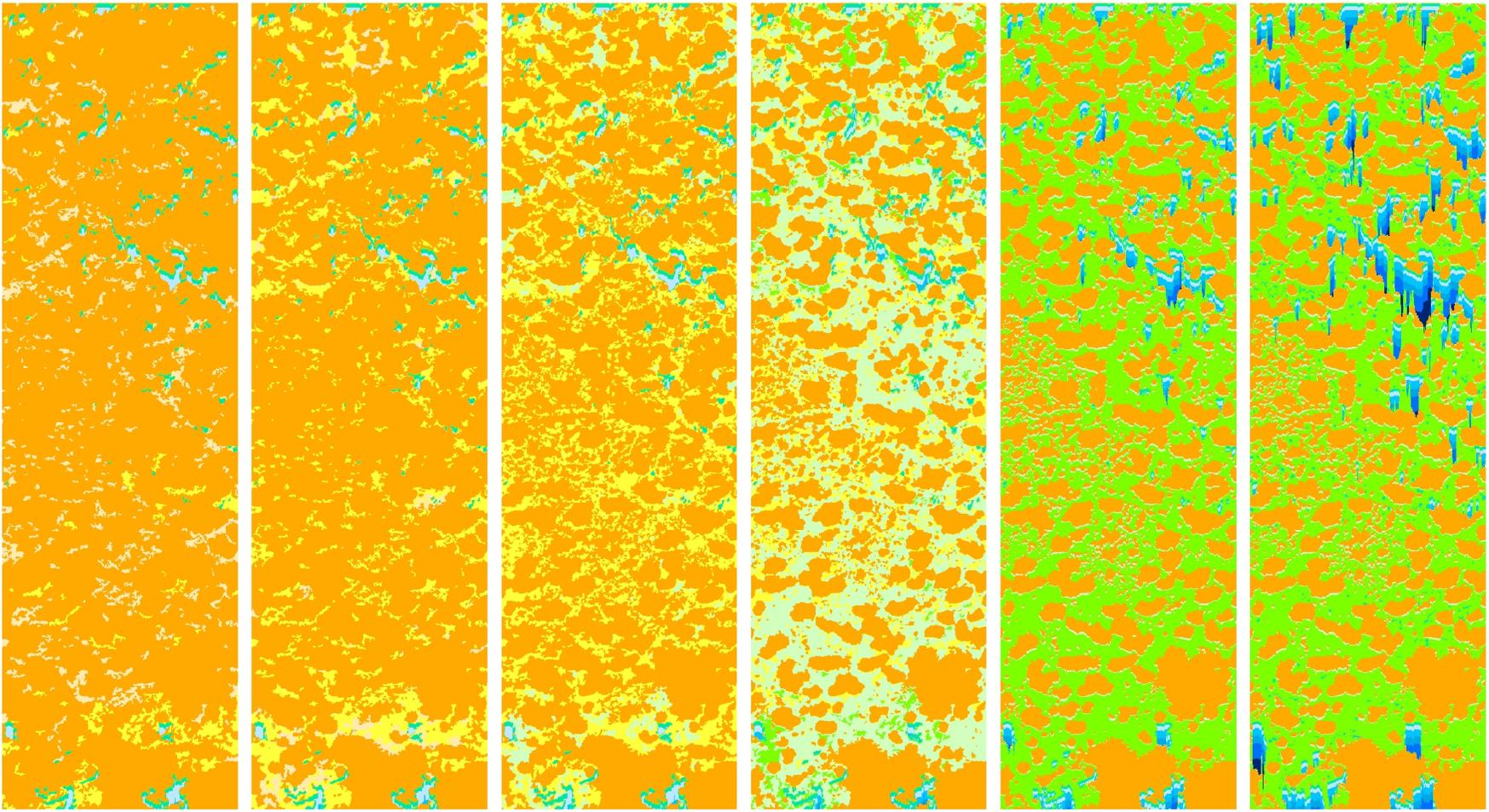


Tiempos (t) seleccionados (min.)



BES

Escorrentía (mm)



t3

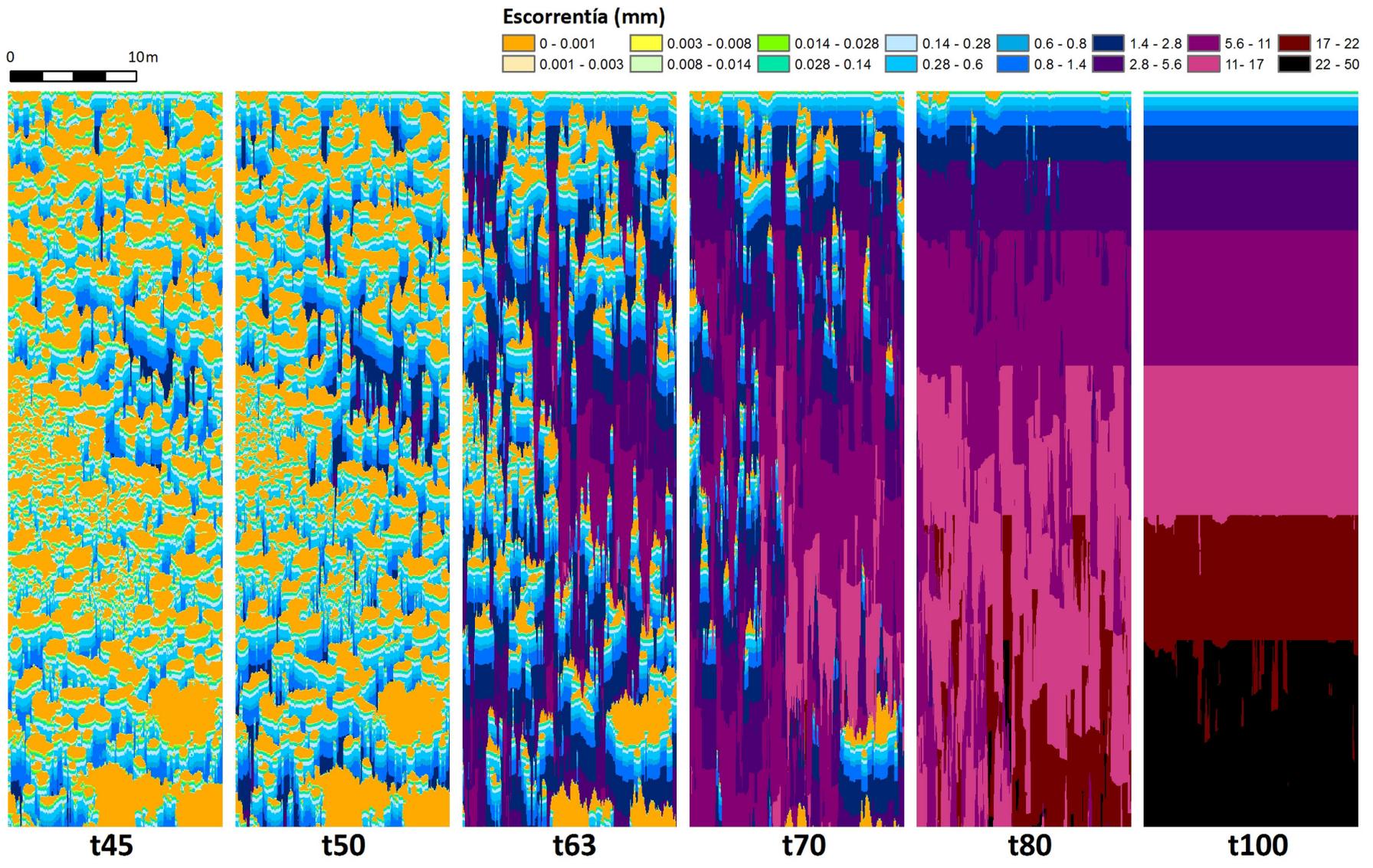
t4

t6

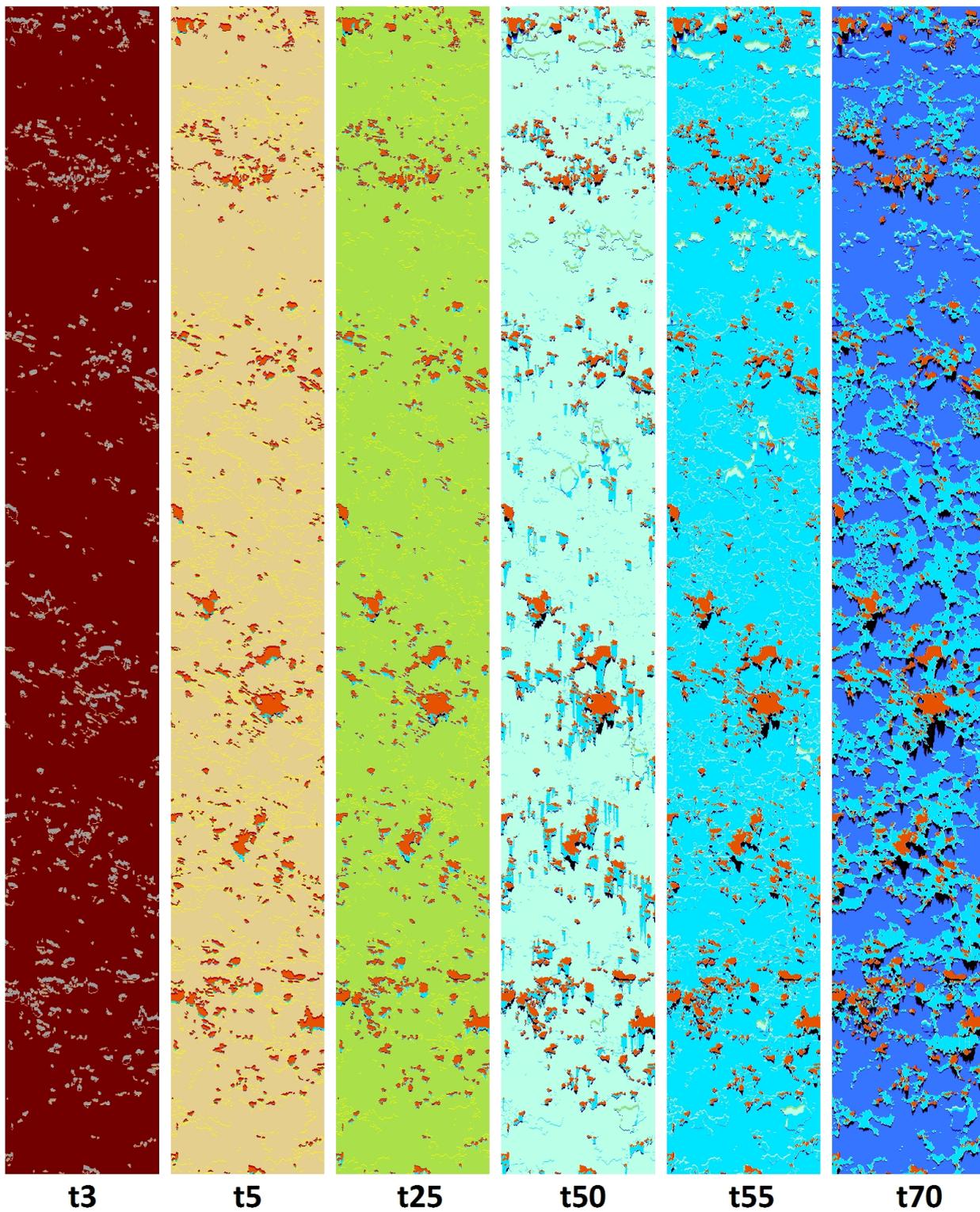
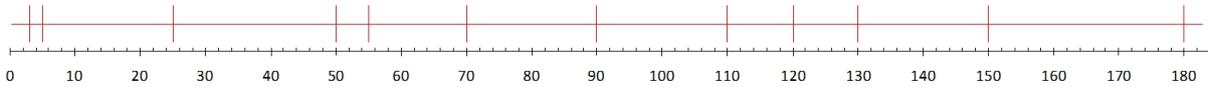
t8

t25

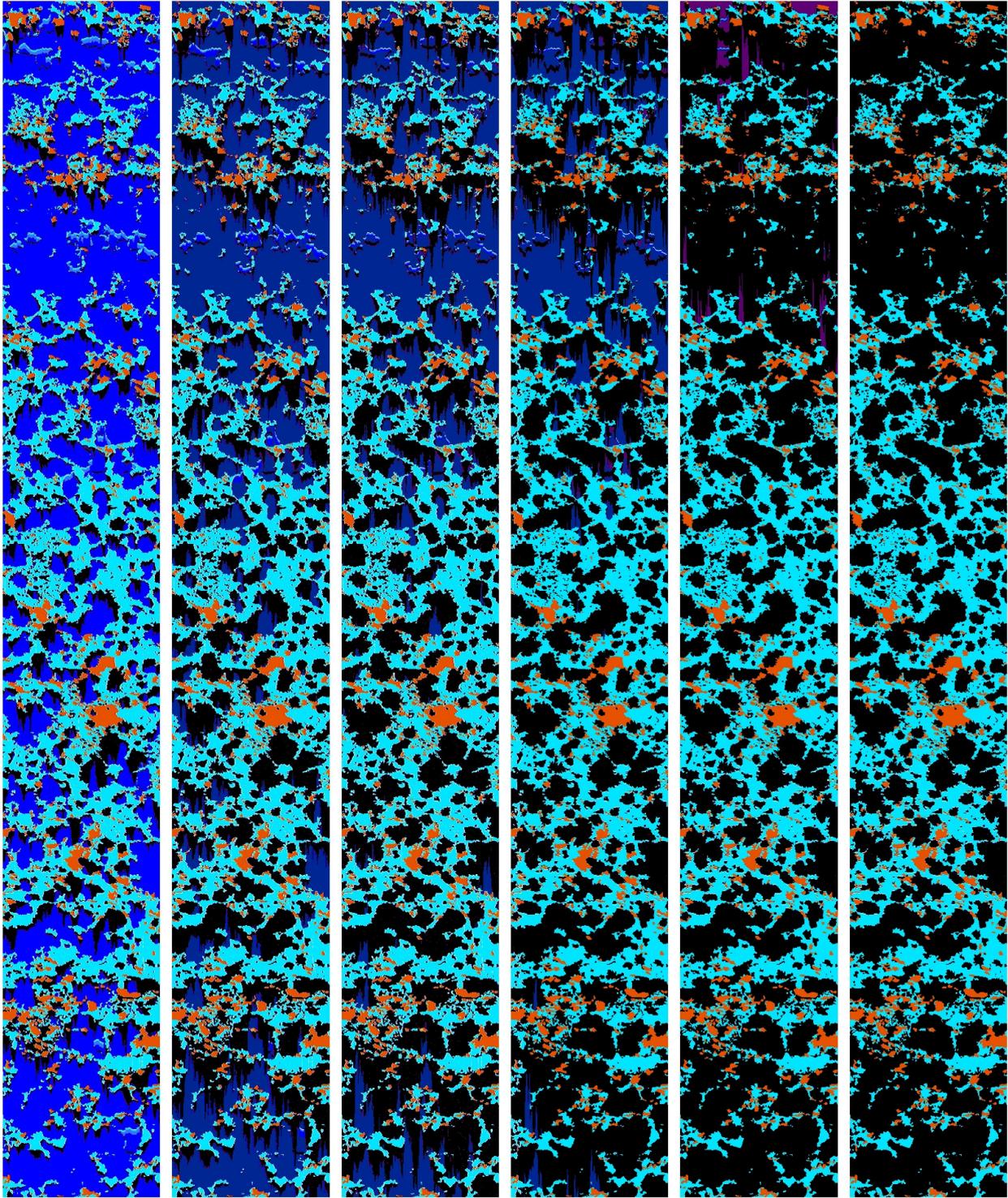
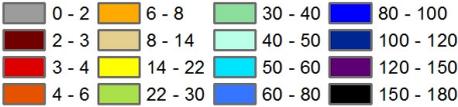
t40



Tiempos (t) seleccionados (min.)



Infiltración (mm)



t90

t110

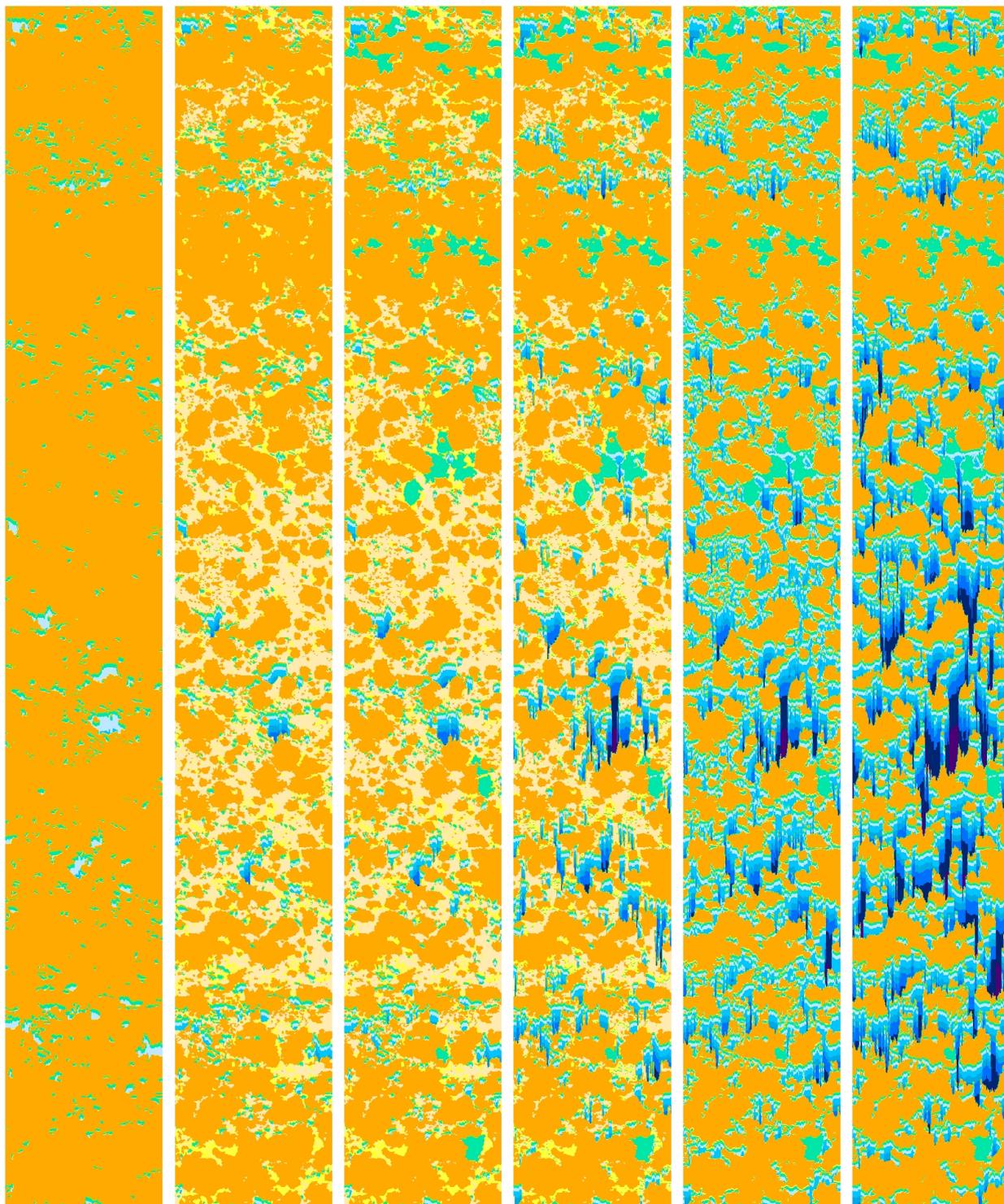
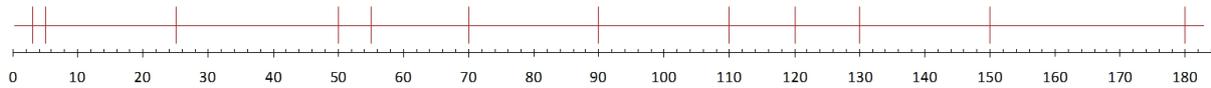
t120

t130

t150

t180

Tiempos (t) seleccionados (min.)



t3

t5

t25

t50

t55

t70

Escurrentía (mm)



CCS

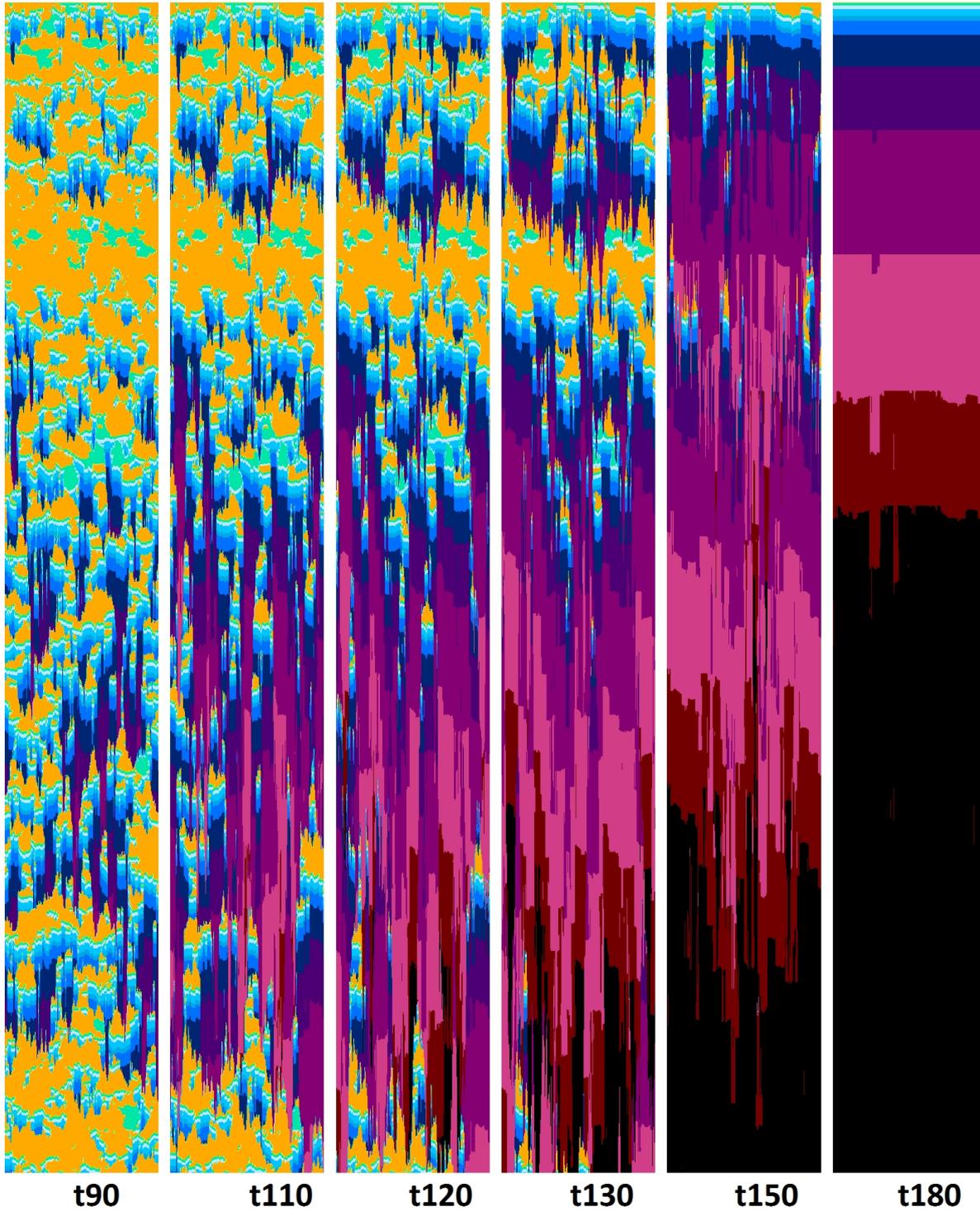


Figura 7.6 Vistas ampliadas de los mapas de secuencia de evolución de la infiltración y escurrentía acumuladas durante el evento modelizado bajo el escenario 2 de respuesta para cada área de estudio (BES; BEN y CCS).

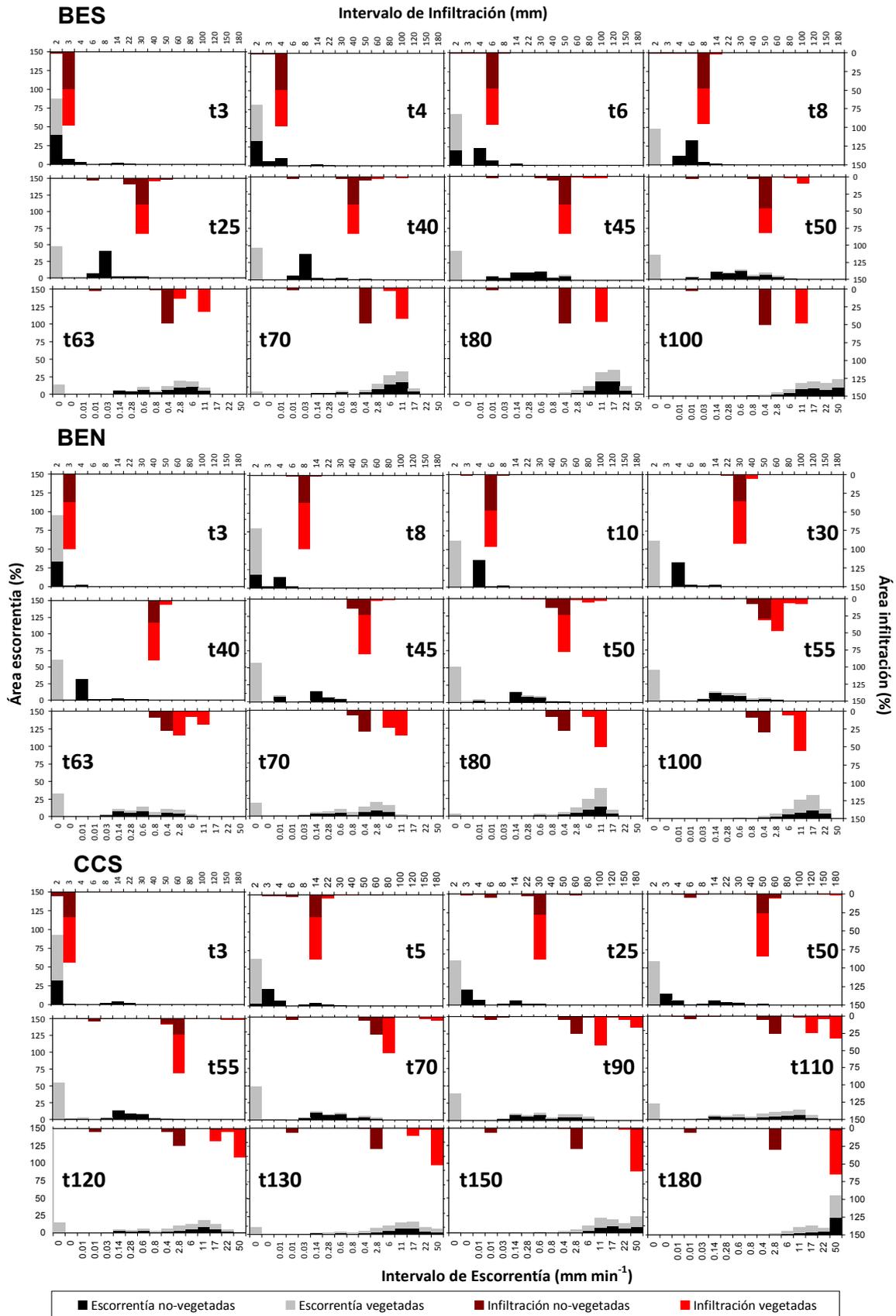


Figura 7.7 Distribución de frecuencias del área ocupada por los diferentes intervalos de escorrentía e infiltración por cada tiempo de la secuencia (barras acumuladas) y área de estudio. Se discrimina entre áreas vegetadas y desnudas.

Las **tasas de escorrentía** aumentaron escalonadamente por la superposición de dos efectos (Figura 7.8a): (a) al paulatino incremento de los coeficientes de escorrentía marcados por los respectivos *hidrogramas tipo* hasta que se alcanzó la estabilidad (F_c); y (b) a la saturación de la superficie de los espacios desnudos (Figura 7.7), y que marca el primer umbral de incremento de las tasas de escorrentía a lo largo del evento (Figura 7.6). Ya en los momentos finales de esta fase se produjo el llenado en algunos de los límites de la vegetación (Figura 7.8b), aunque todavía de manera muy residual (Figura 7.7), pero que ya indicativo de un cambio de tendencia t_{50} y t_{55} para BES y BEN respectivamente y t_{70} para CCS.

Los momentos umbral de comienzo del *llenado efectivo* dependieron, además, de la propia configuración de la escorrentía según la secuencia de aparición de CSS en el transecto. Así patrones espaciales con un largo recorrido de la escorrentía y de elevada magnitud sobre suelo no-vegetado promovieron una más rápida situación de *llenado efectivo* en las zonas de mayor infiltración aguas abajo. El ejemplo paradigmático fue cuando existían afloramientos rocosos, cuyas áreas subsiguientes fueron zonas preferentes de llenado más temprano. Este umbral en BE fue en ambas laderas en torno al t_{40} , mientras que para CCS fue del t_{50} .

(iii) La siguiente fase correspondió con el progresivo avance de ese *llenado efectivo* en los suelos vegetados, en lo que podríamos llamar funcionamiento del **modelo mixto en suelos vegetados**, puesto que ya toda el área de suelo desnudo produce escorrentía de forma análoga al mecanismo por saturación (Figura 7.7). De nuevo, se modificaron los patrones espaciales de generación de escorrentía con el consecuente incremento de la conectividad del flujo (Figura 7.6), a lo que debe añadirse el aumento significativo de los órdenes de magnitud de la escorrentía, cuya progresión a partir de aquí se produjo ya de manera exponencial (Figura 7.8a). Se produjo así la conectividad generalizada entre diferentes sectores de la ladera en todas las laderas, en términos de magnitud y configuración espacial (Figura 7.6). Se observó como el fenómeno de expansión de las áreas conectadas se produjo en forma de mancha de aceite, donde las zonas pioneras fueron dilatándose gradualmente. Es en esta fase cuando se produjo la verdadera diferenciación entre áreas vegetadas y desnudas en el agua almacenada en el suelo (Figura 7.6), una vez se ha llegado al límite de la infiltrabilidad de las no-vegetadas (Figura 7.8b).

La total conectividad de todo el transecto se alcanza en CCS en el t_{150} , en contraste con BE donde en ambas laderas se alcanza alrededor de t_{80} . Estos tiempos se aproximan mucho a la estabilización de la humedad del suelo con experimentos de lluvia simulada de larga duración que se alcanza alrededor del minuto 150 en CC y entre el minuto 50 y 100 en BE (Calvo-Cases *et al.*, 2003). Si bien los límites de llenado del suelo de las áreas vegetadas fueron un factor determinante en la duración de esta fase, fue también relevante la propia configuración de los CSS, en especial la longitud máxima que pueden llegar a alcanzar los parches de vegetación, así como la de su área contribuyente.

(iv) La última y cuarta fase corresponde con una situación extrema en la que una vez alcanzado el límite de *llenado efectivo* del suelo en todo el transecto toda la ladera produce escorrentía y domina, por analogía, el **mecanismo por exceso de saturación** (Figura 7.7), aunque por los experimentos de campo y la determinación de los límites de saturación de suelos en el laboratorio sabemos que hay suelos que en la mayoría de los casos siguen funcionando aún en estas condiciones por el mecanismo hortoniano (Calvo-Cases *et al.*, 2003) que se combina con suelos saturados en superficie y profundidad en distintos puntos de la ladera. Aquí las tasas de escorrentía se mostraron con valores muy extremos, y con una completa conectividad espacial del flujo (Figura 7.6). La variación del

patrón de escorrentía ya sólo afectó a la progresiva estabilización del flujo de escorrentía dependiendo de las diferentes ondas de avance de la escorrentía y de la propia longitud de la ladera.

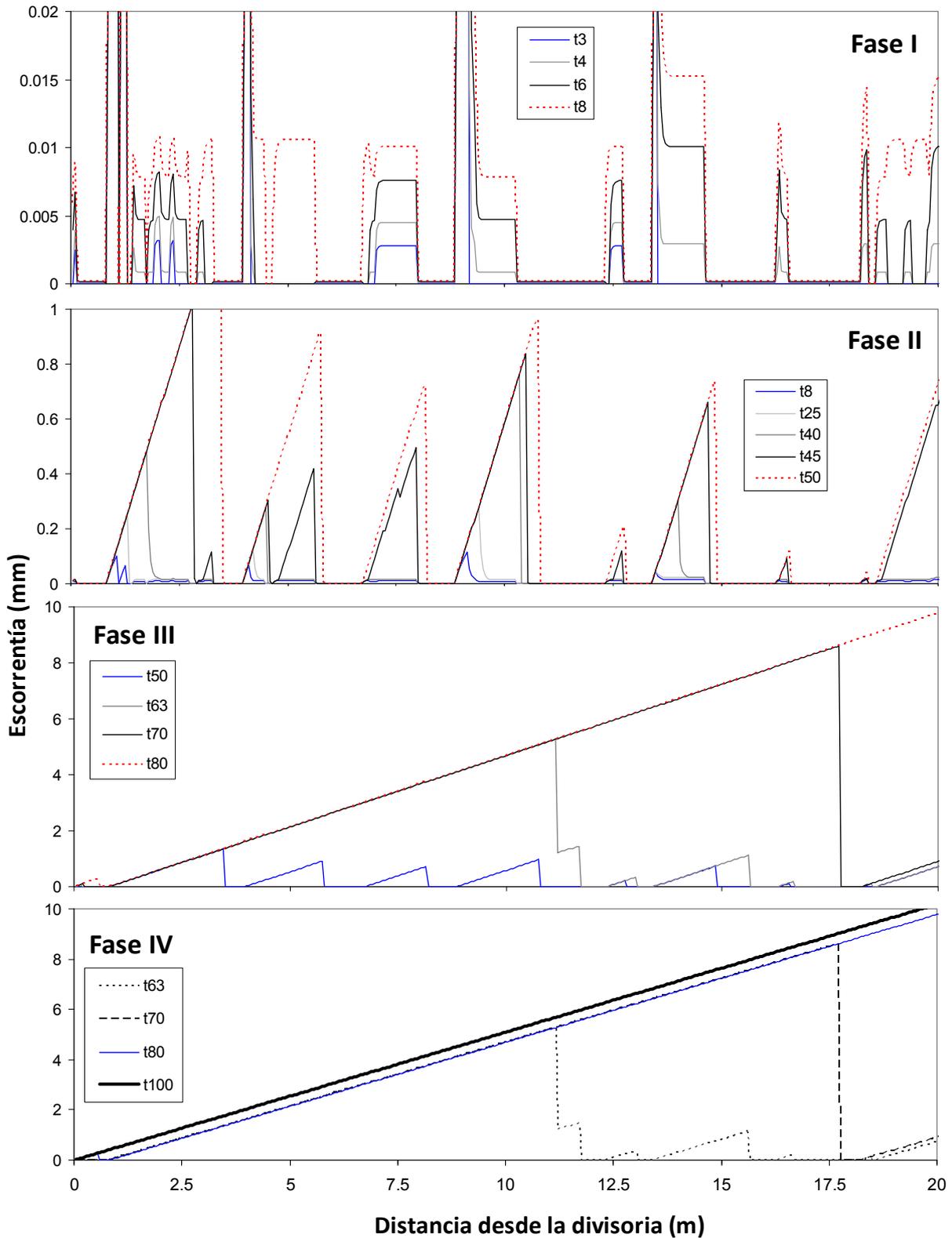


Figura 7.8a Evolución de la escorrentía durante el evento simulado en un perfil longitudinal de un segmento de la ladera BES a través las diferentes fases de respuesta. (Las fases señaladas corresponden a una agrupación más amplia de los intervalos de respuesta).

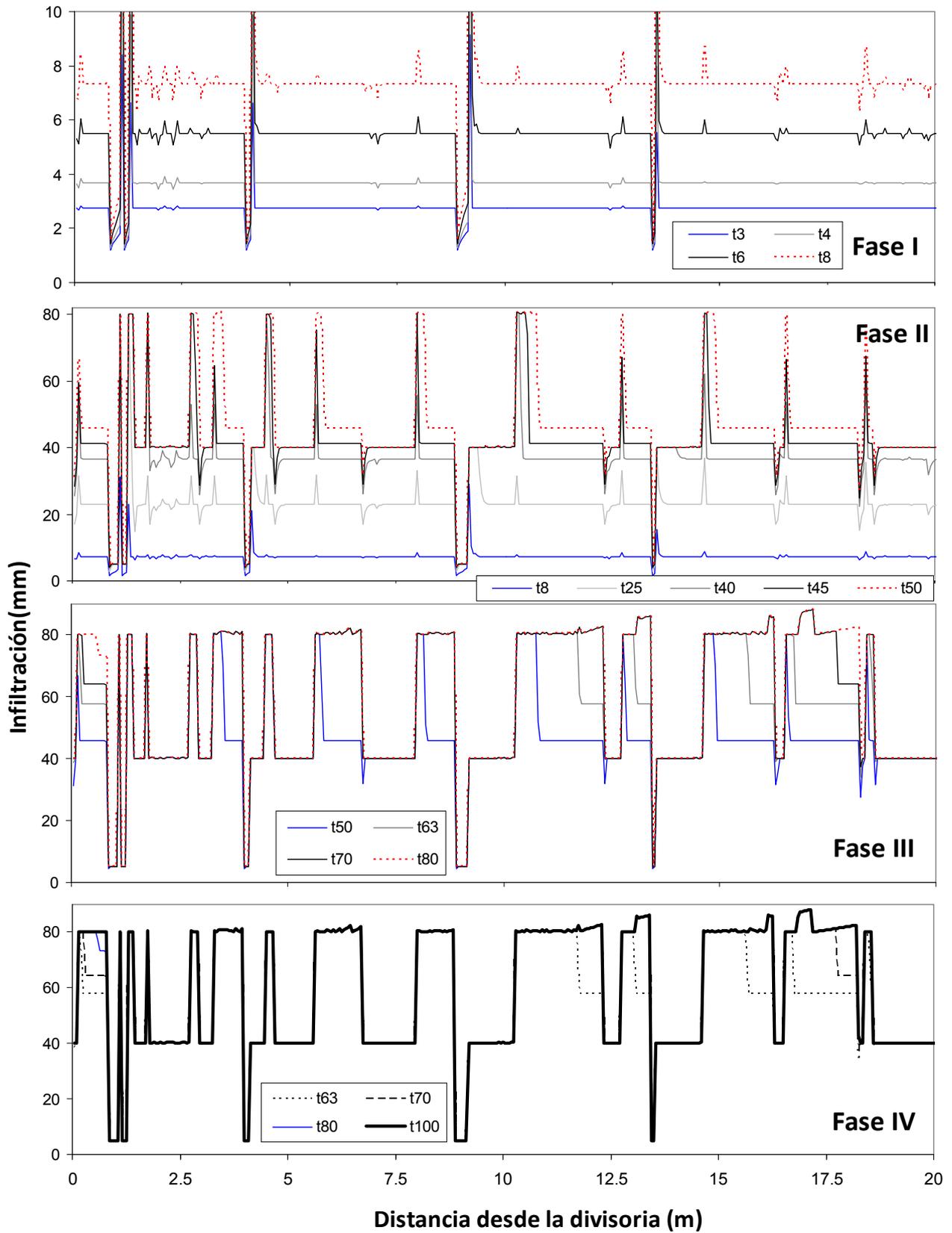


Figura 7.8b Evolución de la infiltración acumulada durante el evento simulado en un perfil longitudinal de un segmento de la ladera BES a través las diferentes fases de respuesta. (Las fases señaladas corresponden a una agrupación más amplia de los intervalos de respuesta).

7.2.2. Patrones espaciales de respuesta a escala de ladera

A partir de las bases de funcionamiento general del *modelo mixto* sintetizadas anteriormente en las cuatro fases de respuesta se analiza aquí su concreción espacial en cada una de las laderas de estudio.

La **temporización** de cada ladera en términos de comienzo y duración de cada una de las cuatro fases en las que se dividió el *modelo de mixto* (Figura 7.9) mostró diferencias entre ambas áreas de estudio, donde CC presentó por lo general una mayor duración en todas las fases, a excepción de la fase-II. Mientras que fue mínimo el contraste entre BES y BEN, donde BEN sólo presentó cierta demora respecto de BES en el comienzo de las fases-II y -III, pero que en términos globales cubrió el ciclo completo en el mismo rango temporal (en el t100).

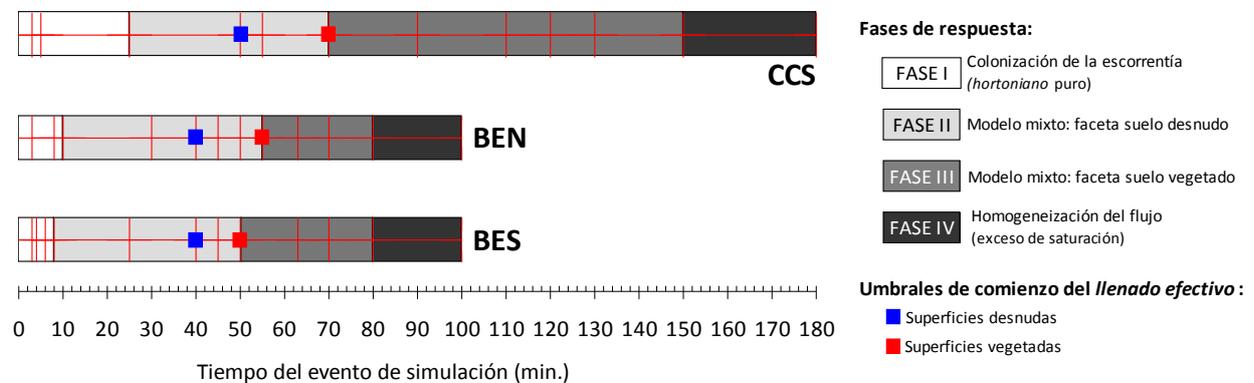


Figura 7.9 Duración relativa de las diferentes fases durante el evento simulado en las tres áreas de estudio mostrando los momentos umbral de comienzo del *llenado efectivo* en áreas vegetadas y desnudas.

Por otro lado, para analizar la variabilidad de la respuesta a escala de ladera necesitamos trascender la observación de un perfil longitudinal, de una línea individual de píxeles (Figura 7.8), hacia una visión integrada en cada tramo que sea representativa del patrón espacial de CSS en el que está inserto, a modo de balance global de las respuestas de todos los CSS que la componen. Para ello se calculó el promedio de escorrentía e infiltración de cada fila (transversal) de celdas (Figuras 7.10; 7.11 y 7.12) permitiendo observar la secuencialización de la respuesta a lo largo del perfil, de forma análoga a cómo se analizaron los patrones de distribución de CSS en el capítulo correspondiente (Capítulo 4). Los sectores obtenidos allí como tipologías de patrones se incluyeron aquí para su valoración en términos de procesos.

En general se observó como en todas las laderas la división por sectores realizada en base a los patrones de distribución de CSS tuvo cierta correspondencia con una dinámica de respuesta, especialmente de la escorrentía. Unos sectores llegaron a comportarse como generadores de escorrentía netos (trayectorias en la escorrentía ascendentes) mientras que otros cumplieron una función de amortiguación en la conectividad de la ladera, aunque estos roles son dinámicos en según qué fase del modelo mixto en que se encuentre. Interesa especialmente cual es el balance en la

exportación neta de flujo a la salida de la ladera, que es la que finalmente determina el *acoplamiento* con el siguiente nivel de escala, con el cauce.

En el análisis por ladera, **BES** (Figura 7.10) es un ejemplo de la correspondencia por sectores y de su dinámica variable a lo largo del evento. En la **fase-I** se estableció un claro contraste entre los dos sectores centrales III y IV (con abundancia de *Brachypodium*) y el resto, lo que indicó que esta zona central fue la última en la que apareció escorrentía (Figura 7.10a), y por tanto con una menor diferenciación en la infiltración (Figura 7.10b). En la zona basal se observó un repunte de la escorrentía. Los valores máximos de flujo se produjeron por la abundancia relativa de superficies de rápida respuesta como los afloramientos de roca madre y pedregosidad embebida (sectores I-II y V).

El caso de **BEN** (Figura 7.11) presentó importantes diferencias respecto a BES. Por un lado careció del efecto multiplicador en la respuesta que ejerció la presencia de afloramientos de roca madre a lo largo del perfil, a excepción de en la parte basal, donde su influencia es nula en la conectividad del resto del transecto. Es por ello que la respuesta se mostró más sensible a los cambios locales de cobertura (Figura 4.16), en especial a los descensos en la vegetación y en las superficies muy blindadas (70FRsup), los cuales provocaron los principales picos de escorrentía de la fase II.

Por otro lado, aquí la conectividad entre sectores fue mucho más limitada, tanto desde el punto de vista de la magnitud de la escorrentía, como que el flujo generado en un punto tiene un menor recorrido debido al efecto barrera de la vegetación.

Desde el punto de vista de la infiltración, los tramos vegetados donde no domina el esparto fueron los que tardaron más en alcanzar el *límite de capacidad de almacenamiento efectivo*, puesto que tienden a formar clusters de vegetación. Además, la infiltración fue muy homogénea a lo largo de todo el transecto, con escasa diferenciación entre vegetado y desnudo, a excepción de la parte basal debido a la presencia de roca.

La ladera de **CCS** (Figura 7.12) fue la que presentó mayor escorrentía en la **fase inicial** debido a la recurrente aparición de afloramientos de roca a lo largo de todo el perfil, con especial incidencia en la parte central (sector III). Luego en la **fase II** las magnitudes máximas alcanzadas se equipararon con la ladera BES debido a sus menores coeficientes de escorrentía que amortiguan el efecto de la escorrentía generada en la roca. Ya en esta fase son los dos sectores centrales los que concentraron la mayor escorrentía, actuando el último sector IV como zona de amortiguación de la onda de avance del flujo.

Durante toda la **fase-III** se produjo una práctica desconexión del sector-I respecto del resto, debido a la presencia de una densa banda de vegetación. Lo mismo ocurrió con el sector-IV, que consiguió amortiguar en buena medida la onda de avance de la escorrentía de los sectores intermedios. Esta configuración, unida a unos mayores límites de saturación, determinó que esta ladera casi duplicase el tiempo total de la simulación necesario respecto de BE para alcanzar una estabilidad del flujo a lo largo de todo el transecto (**fase IV**).

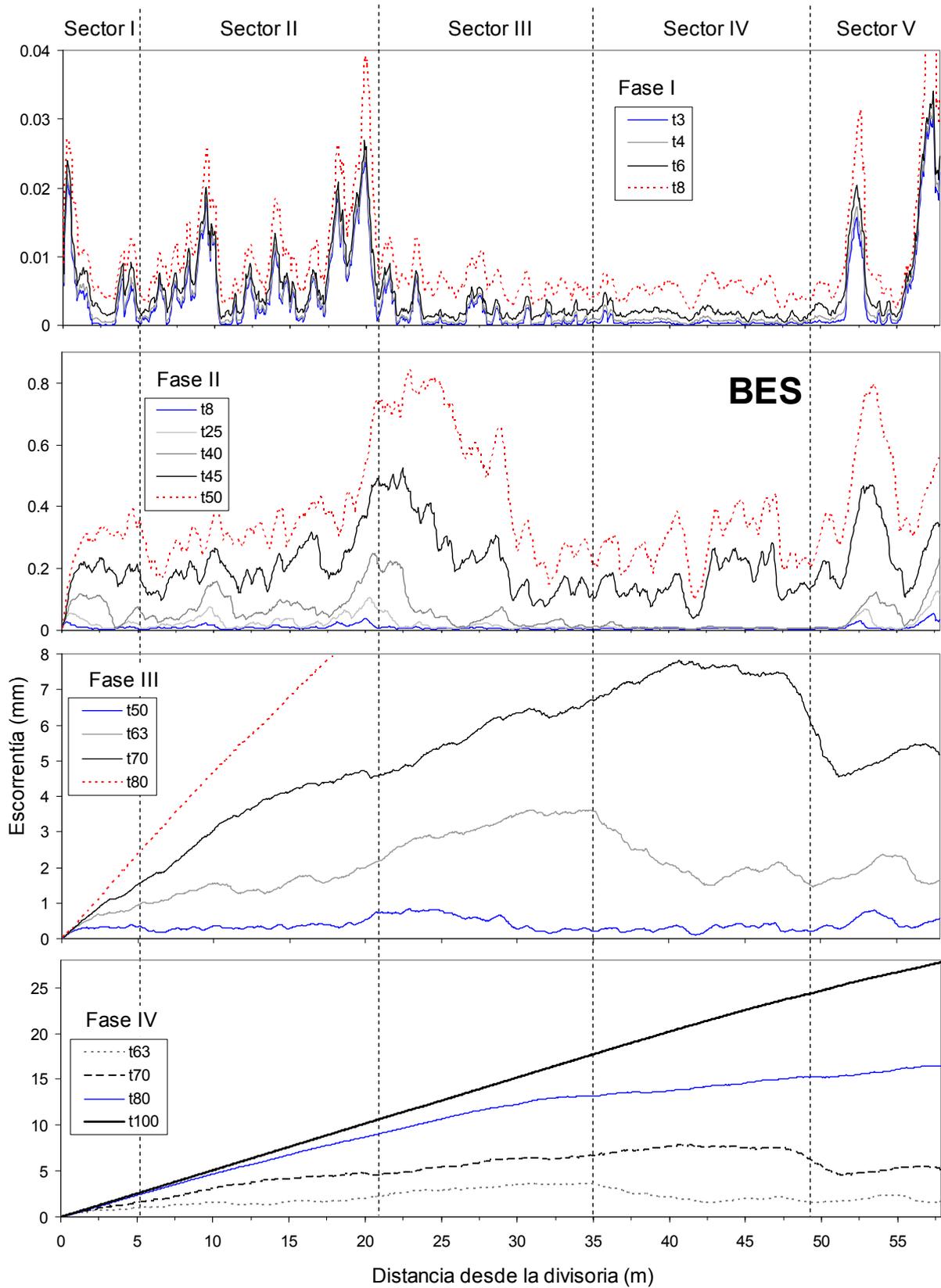


Figura 7.10a Evolución de la escorrentía simulada a lo largo del transecto mediante el valor promedio de cada línea transversal para la ladera BES a través las diferentes fases de respuesta. Se incluye la sectorización en base a la distribución de patrones de CSS.

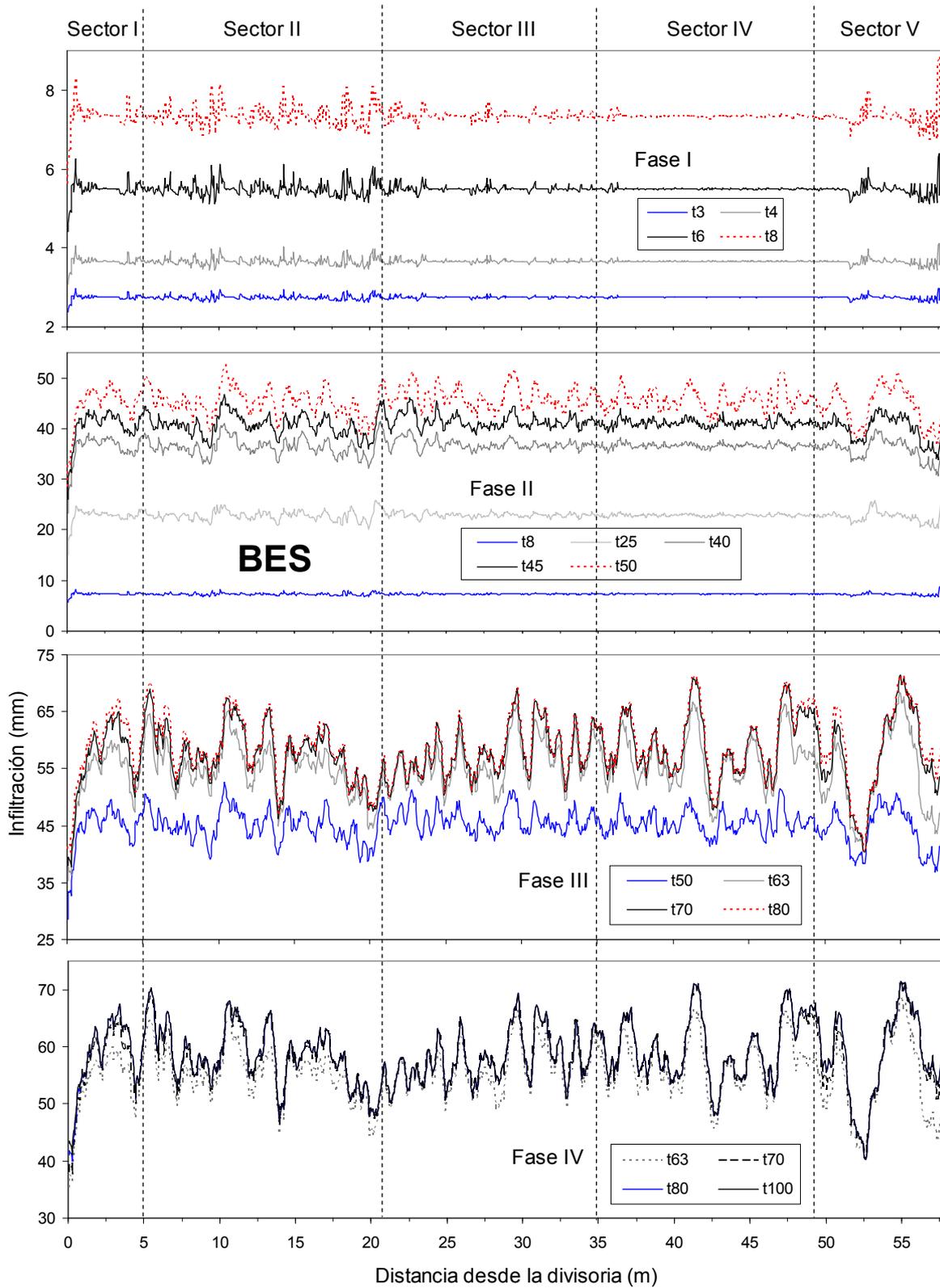


Figura 7.10b Evolución de la infiltración acumulada simulada a lo largo del transecto mediante el valor promedio de cada línea transversal para la ladera BES a través las diferentes fases de respuesta. Se incluye la sectorización en base a la distribución de patrones de CSS.

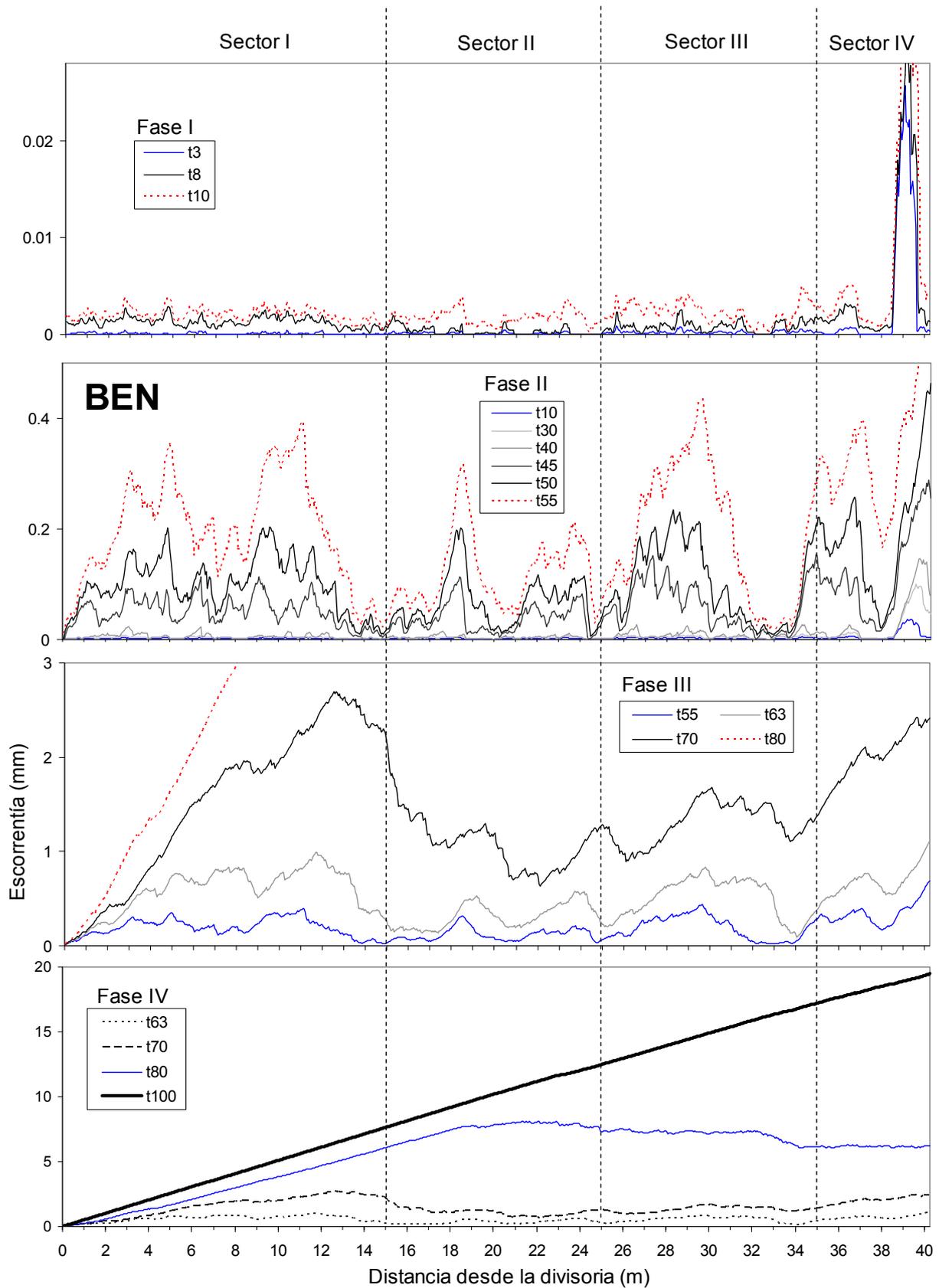


Figura 7.11a Evolución de la escorrentía simulada a lo largo del transecto mediante el valor promedio de cada línea transversal para la ladera BEN a través las diferentes fases de respuesta. Se incluye la sectorización en base a la distribución de patrones de CSS.

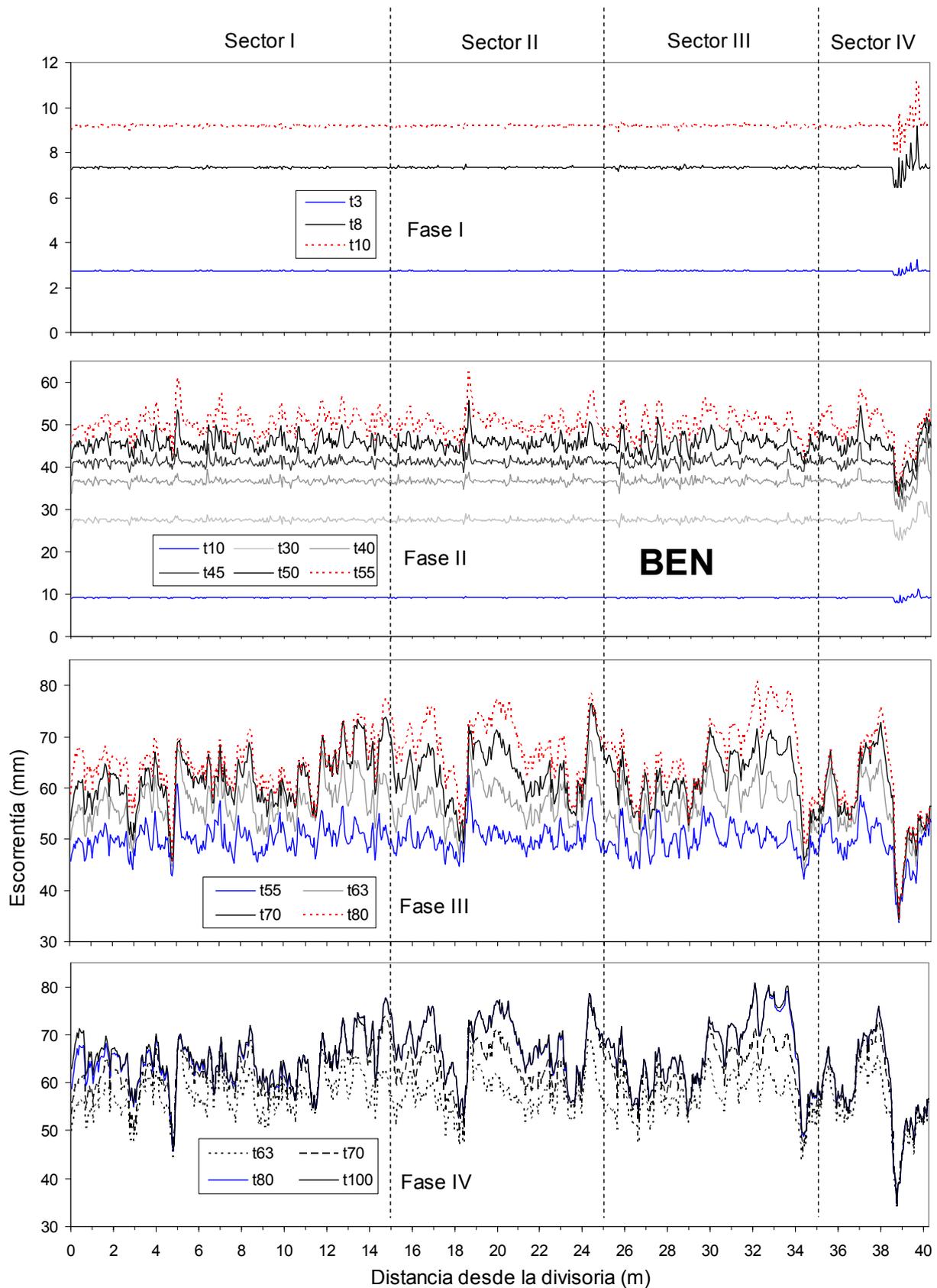


Figura 7.11b Evolución de la infiltración acumulada simulada a lo largo del transecto mediante el valor promedio de cada línea transversal para la ladera BEN a través las diferentes fases de respuesta. Se incluye la sectorización en base a la distribución de patrones de CSS.

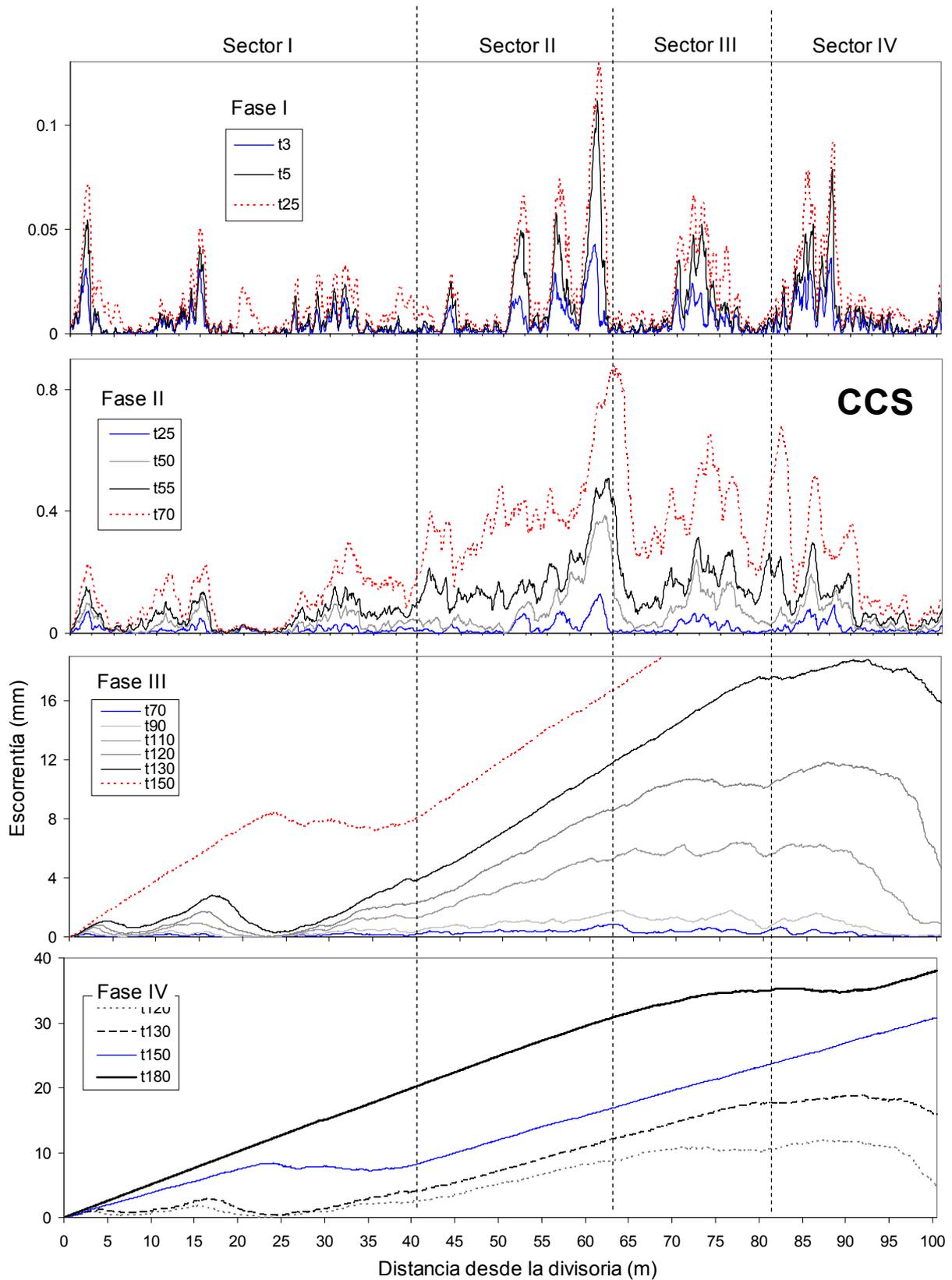


Figura 7.12a Evolución de la escorrentía modelizada a lo largo de la ladera representando la media de cada línea transversal para la ladera CCS a través las diferentes fases de respuesta. Se incluye la sectorización en base a la distribución de patrones de CSS.

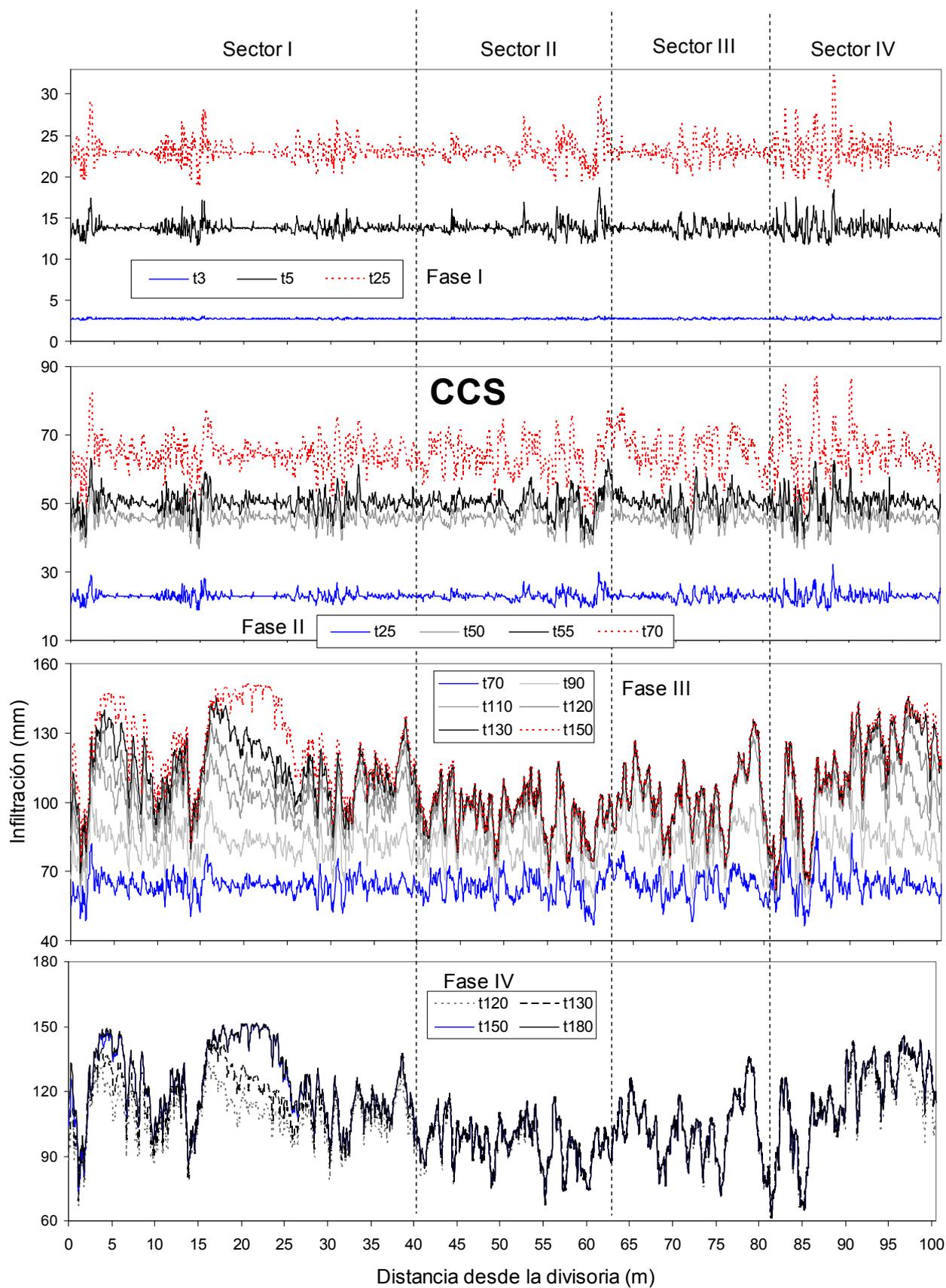


Figura 7.12b Evolución de la infiltración acumulada modelizada a lo largo de la ladera representando la media de cada línea transversal para la ladera CCS a través las diferentes fases de respuesta. Se incluye la sectorización en base a la distribución de patrones de CSS.

En **síntesis**, hay dos factores determinantes que marcaron la conectividad del flujo a lo largo de los transectos. Por un lado la **relación de longitudes fuente-sumidero**, definida por la configuración del patrón de áreas vegetadas y desnudas. Tramos de largas longitudes de suelo desnudo contribuyeron a la amplificación del flujo desde las primeras fases del inicio de la escorrentía. Al tiempo que extensos parches de vegetación permitieron una mayor amortiguación del flujo de aguas arriba, y con ello una mayor duración de la desconexión. Por otro lado, la **presencia de afloramientos rocosos** se reveló como un factor fundamental en la evolución de la conectividad entre diferentes tramos de ladera porque funcionaron como áreas netas de escorrentía durante todo el evento y por tanto, con un mayor potencial de amplificación de este flujo aguas abajo.

Además se contrapusieron dos modalidades de propagación de la escorrentía en un punto y en un momento dado, la **local** vs. la **amplificada**. La primera se refirió a que la respuesta obedecía todavía a las particularidades de las superficies locales *in situ*, que si bien existe propagación de la escorrentía lo hace en los límites de la extensión de las zonas *fuentes-sumidero*. La segunda modalidad responde ya a la transmisión del flujo *ex situ*. Lo que caracterizó a estas ondas de avance de la escorrentía es que sobrepasaron en varios órdenes de magnitud a las partes donde todavía no había ocurrido escorrentía. Y se desencadenó fundamentalmente a partir de algún foco de escorrentía muy elevada como fue el caso de los afloramientos de roca, y cuyo avance se consiguió sobrepasando los límites de almacenamiento de la vegetación que es la que actúa de contención de las ondas. La conectividad general del transecto se incrementó por esta vía de expansión de la escorrentía, rompiendo progresivamente el patrón de distribución en mosaico-fuente sumidero alcanzado en la fase-II.

7.3. CONCLUSIONES

Este capítulo dedicado al proceso de escorrentía a escala de ladera es donde convergen y se interrelacionan las diferentes manifestaciones proceso-patrón abordadas en los otros niveles de escala y en el resto de capítulos de resultados. A esta escala es donde según nuestro punto de vista existen más lagunas en la comprensión de cómo se produce la conectividad del flujo a lo largo de la ladera, por el contrario son mejor conocidas las relaciones de interdependencia, ecohidrológica fundamentalmente, a escala de parcela o *stand* (Ludwig *et al.*, 2005; Mayor *et al.*, 2008).

El **modelo de simulación de la escorrentía** propuesto se basa en la integración de la dimensión **espacial** proveniente del mapa base de la cartografía de CSS, con la dimensión **temporal** asociada al proceso de escorrentía. Está basado en el concepto de **unidad básica de respuesta** (*response unit*, Casenave y Valentin, 1992), la cual presenta un comportamiento homogéneo frente a la escorrentía, y que referido a la escala de parche, está en el origen de la definición de CSS. Esto se corresponde con la lógica de funcionamiento de todo **modelo distribuido**, caracterizados por la incorporación de la dimensión espacial del proceso. Aquí la particularidad es que, a diferencia de los modelos de base física, la respuesta se define mediante el **hidrograma tipo**, el cual es en sí mismo un **modelo integrado de respuesta a la escorrentía de base empírica**, en este caso ajustado al modelo de generación de escorrentía **Hortoniano** o por *exceso de infiltración*. Este es el mecanismo dominante en el ambiente semi-árido (Beven, 2002), donde la capacidad de infiltración de los suelos se ve

superada por la intensidad de la precipitación condicionada por la humedad antecedente del suelo y las características predominantes de los eventos de lluvia (Figura 1.1).

El **salto de escala** desde el **nivel de parche** -en el que es definida la respuesta mediante un *hidrograma tipo* por cada CSS- hasta el **nivel de ladera**, se consigue con la incorporación del patrón de CSS (entendido éste como la secuencia de aparición de los diferentes CSS a lo largo de todo el transecto de ladera), proporcionada por el mapa base de cartografía de CSS. De esta manera aparece implícito el **nivel de parcela o stand**, en el cual se determinan las interrelaciones entre los diferentes CSS (ver apartado 1.1.5). En la **rutina de distribución del flujo** del modelo (Figura 3.4.2) se establecen las reglas de interrelación entre unidades básicas espaciales (píxeles, según la resolución del mapa base de entrada, y siempre inferiores al parche), que son la dirección, velocidad y partición del flujo y los límites de llenado del suelo. En este sentido, el propósito fue desarrollar una rutina que reprodujese de manera simple la distribución del flujo superficial, minimizando la exigencia de entradas que alimenten el modelo. La **regla de partición del flujo**, establecida como **coeficiente de escorrentía** y extraído en cada instante de tiempo a partir del *hidrograma tipo*, fue clave para determinar la respuesta, y donde se condensa la mayor parte del *modelo conceptual de generación de escorrentía* adoptado (ver Figura 3.4.4). La opción del establecimiento de **límites de almacenamiento o llenado efectivo del suelo** fue el otro elemento que determinó la propuesta de ese *modelo conceptual general* de funcionamiento, mientras que los valores que se le atribuyeron a cada CSS configuraron el escenario concreto de simulación, tratando así de reproducir las condiciones particulares de cada sitio (*modelo del sitio*). La opción *sin límites de almacenamiento* no permite en ningún momento el *llenado efectivo* del suelo. Ante la disponibilidad tanto de los elementos necesarios para alimentar el modelo (*hidrogramas tipo*; mapa base de CSS), como de datos de medida de la respuesta bajo condiciones de lluvia natural (parcelas Gerlach) se obtuvieron dos resultados. Por un lado (i) se **probó que el modelo conceptual de respuesta** que más se ajustó al comportamiento real de la escorrentía fue el que incorpora **límites de llenado efectivo del suelo**; (ii) siendo ésta la opción utilizada para la modelización de la escorrentía **a la escala de ladera**, esta vez ya con el propósito de profundizar en su funcionamiento en cuanto a mecanismos control y umbrales de respuesta. Como el modelo fue contrastado con datos de la medición en campo en condiciones reales, que aún sin dotarle de una validez definitiva sí le confiere un mayor grado de certidumbre, se establecieron las bases de una **hipótesis** sobre el **funcionamiento general del Modelo Mixto de escorrentía** (Calvo-Cases *et al.*, 2003), sintetizada en **cuatro fases de respuesta** (Figura 7.8), en función de umbrales de cambio en los patrones de conectividad de la escorrentía, espacial y en magnitud.

La salida del modelo de simulación se presentó en forma de **secuenciación** de la **escorrentía instantánea** y de **infiltración acumulada** en una serie de tiempos seleccionados (t_i) a lo largo del evento, diferente según la ladera para mostrar las situaciones umbral características en cada caso, y en diferentes formatos para su análisis: en mapas (Figura 7.4), distribución de frecuencias (Figura 7.6) y perfiles longitudinales, en los que además se mostraron los sectores de los patrones de configuración de CSS obtenidos en el Capítulo 4 (Figuras 7.9 a 7.11). Así, se obtuvo una visión discretizada de la evolución de la respuesta a lo largo del evento pero en el continuo del transecto, poniendo en evidencia los diferentes **umbrales de conectividad** entre los diferentes **sectores de la ladera**, umbrales tanto de **conexión espacial** como de disparo en las **magnitudes de la escorrentía**.

Se observó una buena **correspondencia entre los patrones de respuesta y los de configuración espacial** (Figuras 7.9 a 7.11), estos últimos representados en los diferentes sectores de la ladera (Capítulo 4). La confluencia de ambos resultados valida de alguna manera las metodologías respectivas de obtención de los patrones de escorrentía y de configuración de CSS.

Se han encontrado además dos modalidades de comportamiento contrastados que en algunos momentos del evento coexisten, y que evolucionan a lo largo del evento. Se identifican sectores en los que la magnitud de la escorrentía se **amplifica** a medida que avanza el evento de precipitación, y que corresponden con áreas donde hay CSS con un inicio temprano y altas tasas de escorrentía (roca y superficies sin blindaje superficial). Y otros sectores que sin embargo ejercen una función de **amortiguación** de estas ondas de avance de la escorrentía. Este contraste en el comportamiento de los diferentes sectores viene marcado tanto por la **composición** interna de sus tipologías de CSS, como de la relación de longitudes entre áreas generadoras (no-vegetadas) y receptoras (vegetación) netas de escorrentía, esto último en lo que venimos a denominar **relaciones fuente-sumidero**.

La cuestión más relevante que se deriva de este resultado es que la secuencia de tipos de respuesta hidrológica (el orden de aparición en la ladera) condicionada por el patrón de CSS, entre otros factores, que determina la respuesta hidrológica general de la ladera en su base, y por tanto afectando a la exportación neta de agua y sedimentos fuera del sistema ladera (Yair, 1983; Puigdefábregas *et al.*, 1999; Cammeraat, 2004; Rodríguez-Caballero *et al.*, 2015).

CAPÍTULO 8

CONCLUSIONES GENERALES

1. Esta tesis combina un amplio **desarrollo metodológico** referido a captación y análisis de datos, con parte experimental en campo y modelización. Aplicado a dos áreas de estudio que corresponden a los extremos de un gradiente climático dentro del clima mediterráneo, sub-húmedo y semi-árido. Estas áreas han sido objeto de trabajos previos, por lo que se parte de un **amplio conocimiento** que ha permitido, además de una progresiva valoración de la aptitud de las metodologías desarrolladas, profundizar en el estudio de los **procesos eco-hidro-geomorfológicos** a la escala de ladera.
2. Se construyó un **marco conceptual y metodológico** dentro de la **Teoría General de Sistemas** regido por la **jerarquía de niveles de escala** que sirvió para estructurar el análisis e interpretación de los resultados centrado en la **aproximación proceso-patrón**, o distribución espacial de las propiedades de forma de las laderas representadas por los componentes presentes en la superficie del suelo.
3. El diseño de este marco conceptual permitió desarrollar el **objetivo general** de estudiar los **procesos geomorfológicos** de generación de escorrentía y movilización de sedimento definiendo el papel en los mismos de los patrones espaciales de distribución de los componentes superficiales del suelo (CSS) en las laderas. Además, posibilitó un avance en las metodologías concretas de análisis y en el conocimiento en varios niveles de escala espacial y temporal (parche, parcela y ladera; períodos de varios años y eventos, respectivamente).
4. Se confirma la **hipótesis de partida** de que los componentes superficiales del suelo (CSS) son una **fuentes de heterogeneidad espacial** desde la escala de parche y parcela, y desempeñan un papel clave en los procesos geomórficos de generación de escorrentía y movilización de sedimento, controlando asimismo estos procesos a escala de ladera. Su incorporación en la modelización a esta escala puede ayudar obtener mejores resultados en las salidas de modelos a esta escala, a entender mejor el funcionamiento hidro-geomorfológico de las laderas y a detectar umbrales de conectividad. Estos últimos a su vez determinan la respuesta general del sistema.

5. El avance en el análisis de los resultados obtenidos a partir de experimentos de campo con lluvia simuladas puso de manifiesto la **relevancia de la fracción abiótica de los CSS** como reguladora de las dinámicas de evolución de la superficie del suelo, y con ellas de los procesos y balances eco-hidro-gemorfológicos del sistema, especialmente ante la aridización de las condiciones climáticas. Concretamente el control ejercido por la presencia de fragmentos rocosos (FR) superficiales, sintetizado en el **ciclo de retroalimentación de blindaje superficial** sujeto a umbrales de cobertura y posición relativa de estos FR. La presencia de FR está asimismo limitada por la profundidad del perfil de suelo, constituyéndose así las áreas de afloramientos rocosos como uno de los principales signos de degradación irreversible de estos sistemas mediterráneos.
6. A partir de una sencilla **modelización de la escorrentía**, el modelo desarrollado se apoyó en la respuesta hidrológica de los CSS y en su patrón de distribución, se concluye que su **secuenciación** es una de las claves que determina la respuesta hidrológica de la ladera. De esta disposición espacial de CSS en sentido longitudinal siguiendo la máxima pendiente **emerge** una configuración de patrones específicos con unas diferentes **relaciones fuente-sumidero** que compartimentan las laderas en **sectores** contrastados respecto de su balance de flujo superficial (agua y sedimentos).
7. El modelo, aplicado con una lluvia de igual intensidad (55 mm h^{-1}) que la de los experimentos de simulación de lluvia, permitió delimitar una serie de valores umbral de precipitación acumulada entre los que se produce el inicio del *llenado efectivo* y la conectividad entre sumideros de las laderas. Estos umbrales son mucho más amplios en el subhúmedo de Cocoll (de 45 a 138 mm de lluvia) que en el semiárido de Benidorm (de 37 a 74 mm), alcanzando este último con mucha mayor facilidad la conectividad hidrológica de la ladera. El análisis de la serie de datos de las parcelas de campo, en las que la escorrentía es consecuencia de precipitaciones naturales con distribución variable de las intensidades de lluvia, se encuentra dentro de los rangos de estos valores, siempre que se trate de eventos con intensidades máximas elevadas y con continuidad horaria.
8. Las relaciones del **binomio fuente-sumidero** se definen por la **composición** y **longitud** de los tipos de CSS que la integran, de modo que determinan diferentes momentos de *llenado efectivo* del perfil de suelo en profundidad. Además, los umbrales de *saturación efectiva* de cada tipo de CSS vienen marcados además por las propias características de los suelos en cada área de estudio, relacionados con su profundidad y características físico-químicas.
9. Esto configura una **jerarquía de umbrales** de respuesta según los diferentes CSS y niveles de escala hasta llegar a la **conectividad** hidrológica a escala de ladera, la cual se definió en términos de **conexión espacial** y **magnitud de la escorrentía**, ambos en una relación de interdependencia. A **escala de ladera**, la conectividad entre diferentes sectores, capaz de exportar flujo al cauce, viene determinada asimismo por la **secuenciación** de estos sectores con diferente patrón de distribución. En este caso las relaciones entre sectores se sintetizaron en **amplificación vs. amortiguación de la onda de avance de la escorrentía**.

10. La materialización de todas estas consideraciones patrón-respuesta en la casuística particular de cada sitio tiene una lectura en términos de **valoración general del funcionamiento del sistema**. Siguiendo el **modelo de referencia** de Lavee *et al.*, (1998) que relaciona el gradiente climático con los *patrones de distribución* de las áreas fuente-sumidero, la ladera de Cocoll (CC) presenta un **patrón de degradación**, mientras que los de las laderas de Benidorm (BE) atienden a una **configuración funcional** propia de la adaptación del medio semi-árido a la escasez de hídrica. Las diferencias encontradas entre ambas laderas de BE puso de manifiesto la sensibilidad de estos medios semi-áridos a leves cambios micro-ambientales, en este caso por efecto de la exposición contrastada (Norte-Sur).

11. Finalmente, el **marco conceptual propuesto y el desarrollo de las metodologías concretas de análisis e interpretación de las formas en clave de procesos** ha permitido llegar a conclusiones desde las cuales se pueden **generar nuevas hipótesis de funcionamiento de los sistemas**. Al tiempo que ofrece potencial para una **línea de investigación futura** en la profundización de procesos y diagnóstico del estado de degradación de los sistemas a partir **estudios comparativos a escala regional**. Se destaca la simplicidad de los medios requeridos para su implementación, especialmente con el reciente desarrollo de tecnologías de captación de imágenes de alta resolución y cada vez mayor extensión y normalización de su uso con fines para la investigación.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguiar, M.R., Sala, O.E., 1999. Patch structure, dynamics and implications for the functioning of arid ecosystems. *Trends in Ecology & Evolution* 14 (7), 273-277.
- Alexander, R.W., Calvo, A., 1990. The influence of lichens on slope processes in some spanish badlands. En J.B. Thornes (Editor). *Vegetation and Erosion. Processes and environments*. Wiley. Chichester. 385-398.
- Allen, C.R., Holling, C.S., 2002. Cross-scale structure and scale breaks in ecosystems and other complex systems. *Ecosystems* 5, 315-318.
- Arnau-Rosalén, E., Calvo Cases, A., Boix-Fayos, C., Lavee, H., Sarah, P., 2008. Analysis of soil surface component patterns affecting runoff generation. An example of methods applied to Mediterranean hillslopes (Alicante, Spain). *Geomorphology* 101 (4), 595-606.
- Bautista, S., Mayor, A.G., Bourakhouadar, J., Bellot, J., 2007. Plant spatial pattern predicts hillslope runoff and erosion in a semiarid mediterranean landscape. *Ecosystems* 10, 987-998.
- Belmonte Serrato, F., Romero Diaz, A., 1998. A simple technique for measuring rainfall interception by small shrub: "Interception flow collection box". *Hydrological Processes* 12(3), 471-481. Belmonte-Serrato, F., Romero-Díaz, A., 2013. Interceptación de la lluvia por la vegetación en España. Fundación Instituto Euromediterráneo del Agua (IEA), pp 382.
- Belnap, J., Eldidge, D., 2003. Disturbance and recovery of biological soil crusts. En Belnap, J., Lange, O. (Eds.) *Biological Soil Crusts: Structure, Function, and Management*. Ecological Studies Series 150. Springer-Verlag, Berlín, 401-415.
- Bergkamp, G., 1998. A hierarchical view of the interactions of runoff and infiltration with vegetation and microtopography in semiarid shrublands. *Catena* 33 (3-4), 201-220.
- Bergkamp, G., Cammeraat, L.H., Martinez-Fernandez, J., 1996. Water movement and vegetation patterns on shrubland and an abandoned field in two desertification-threatened areas in Spain. *Earth Surface Processes Landforms* 21(12), 1073-1090.
- Beven, K., 2002. Runoff generation in semi-arid areas. En Bull, L.J. y Kirkby, M.J. (Eds.) *Dryland rivers: hydrology and geomorphology of semi-arid channels*. Wiley, 57-106
- Beven, K.J., Kirkby, M.J., 1979. A physically based, variable contributing area model of basin hydrology. *Hydrological Sciences Bulletin des Sciences Hydrologiques*, 24(1), 43-69.
- Bochet, E., Poesen, J., Rubio, J.L., 2000. Mound development as an interaction of individual plants with soil, water erosion and sedimentation processes on slopes. *Earth Surface Processes Landforms* 25(8), 847-867.

- Boer, M. Puigdefabregas, J., 2005. Effects of spatially structured vegetation patterns on hillslope erosion in a semiarid Mediterranean environment: a simulation study. *Earth Surface Processes and Landforms* 30 (2), 149-167.
- Boix-Fayos, C., 1997. The role of texture and structure in the water retention capacity of burnt Mediterranean soils with varying rainfall. *Catena* 31, 219-236.
- Boix Fayos, C., 2000. Procesos geomórficos en diferentes condiciones ambientales mediterráneas: el estudio de la agregación y la hidrología de los suelos. Tesis Doctoral. Universitat de Valencia, 394 p.
- Boix-Fayos, C., Imeson, A.C., Schoorl, J.M., Soto, S., Tiemessen, I.R., 1995. Properties and erosional response of soils in a degraded ecosystem in Crete (Greece). *Environmental Monitoring and Assessment* 37, 79-92.
- Boix-Fayos, C., Calvo-Cases, A., Imeson, A.C., Soriano-Soto, M.D., Tiemessen, I.R., 1998. Spatial and short-term temporal variations in runoff, soil aggregation and other soil properties along a Mediterranean climatological gradient. *Catena* 33 (2), 123-138.
- Boix-Fayos, C., Calvo-Cases, A., Imeson, A.C., 1999. Implicaciones del cambio climático sobre los procesos geomórficos en el ámbito mediterráneo. Estado de la cuestión. *Cuadernos de Geografía* 65-66, 27-44.
- Boix-Fayos, C., Calvo-Cases, A., Imeson, A.C., Soriano-Soto, M.D., 2001. Influence of soil properties on the aggregation of some Mediterranean soils and the use of aggregate size and stability as land degradation indicators. *Catena* 44 (1), 47-67.
- Boix-Fayos, C., Martínez-Mena, M., Arnau-Rosalen, E., Calvo-Cases, A., Castillo, V., Albaladejo, J., 2006. Measuring soil erosion by field plots: Understanding the sources of variation. *Earth-Science Reviews* 78 (3-4), 267-285.
- Boix-Fayos, C., Martínez-Mena, M., Calvo-Cases, A., Arnau-Rosalen, E., Albaladejo, J., Castillo, V., 2007. Causes and underlying processes of measurement variability in field erosion plots in Mediterranean conditions. *Earth Surface Processes and Landforms* 32 (1), 85-101.
- Bond, B., 2003. Hydrology and ecology meet—and the meeting is good. *Hydrological Processes* 17, 2087-2089.
- Bracken, L.J., Croke, J., 2007. The concept of hydrological connectivity and its contribution to understanding runoff-dominated geomorphic systems. *Hydrological Processes*, 21, 1749-1763.
- Brakensiek, D.L., Rawls, W.J., 1994. Soil Containing Rock Fragments - Effects on Infiltration. *Catena* 23 (1-2), 99-110.
- Bray, J. R., J. T. Curtis. (1957) An ordination of upland forest communities of southern Wisconsin. *Ecological Monographs* 27, 325-349.
- Brierley, G., Fryirs, K., Jain, V., 2006. Landscape connectivity: the geographic basis of geomorphic applications. *Area* 38, 165–174
- Briske, D.D., Fuhlendorf, S.D., Smeins, F.E., 2006. A unified framework for assessment and application of ecological thresholds. *Rangeland Ecology and Management* 59(3), 225-236.

- Brunsdon, D., Thornes, J.B., 1979. Landscape sensitivity and change. *Transactions of the Institute of British Geographers* 4, 463–484.
- Cadenasso, M.L., Pickett, S.T.A., Grove, J.M., 2006. Dimensions of ecosystem complexity: Heterogeneity, connectivity, and history. *Ecological Complexity* 3(1), 1-12.
- Calvo-Cases, A., 1987. *Geomorfología de laderas en la montaña del País Valenciano*. Colección Politécnica, 301 pp., I. V. E. I., Valencia.
- Calvo, A., Gisbert, B., Palau, E., Romero, M., 1988. Un simulador de lluvia de fácil construcción. En: Sala, M., Gallart, F. (Eds.), *Métodos y técnicas para la medición en el campo de procesos geomorfológicos*, 1. Sociedad Española de Geomorfología, Zaragoza, pp. 6-15.
- Calvo-Cases, A., Harvey, A.M., Paya-Serrano, J., Alexander, R.W., 1998. Response of badland surfaces in South East Spain to simulated rainfall. *Cuaternario y Geomorfología* 5, 3-14.
- Calvo, A., Ruiz, J.D., Sarah, P., Katra, I., Zvikel, S., Arnau, E., Lavee, H., 2003b. The spatial distribution of surface cover components that control geomorphic processes on hillslopes along a Mediterranean – Arid transect. En: *Final Meeting and Conference: "Soil Erosion and Global Change – Results and New Perspectives"*. COST Action 623, Budapest, pp.
- Calvo-Cases, A., Boix-Fayos, C., Imeson, A.C., 2003. Runoff generation, sediment movement and soil water behaviour on calcareous (limestone) slopes of some Mediterranean environments in southeast Spain. *Geomorphology* 50 (1-3), 269-291.
- Calvo-Cases, A., Boix-Fayos, C., Arnau-Rosalen, E., 2005. Patterns and thresholds of runoff generation and sediment transport on some Mediterranean hillslopes. En: Garcia, C. y Batalla, R. J. (Eds.), *Catchment Dynamics and River Processes: Mediterranean and Other Climate Regions*. Elsevier, Amsterdam, 31 – 51.
- Cammeraat, L.H., 2002. A review of two strongly contrasting geomorphological systems within the context of scale. *Earth Surface Processes and Landforms* 27 (11), 1201-1222.
- Cammeraat, E.L.H., 2004. Scale dependent thresholds in hydrological and erosion response of a semi-arid catchment in southeast Spain. *Agriculture Ecosystems & Environment* 104 (2), 317-332.
- Cammeraat, L.H., Imeson, A.C., 1999. The evolution and significance of soil-vegetation patterns following land abandonment and fire in Spain. *Catena* 37 (1-2), 107-127.
- Cammeraat, E.L.H., Risch, A.C., 2008. The impact of ants on mineral soil properties and processes at different spatial scales. *Journal of Applied Entomology* 132(4), 285-294.
- Cammeraat, L.H., Willott, S.J., Compton, S.G., Incoll, L.D., 2002. The effects of ants' nests on the physical, chemical and hydrological properties of a rangeland soil in semi-arid Spain. *Geoderma* 105, 1-20.
- Canton, Y., Domingo, F., Sole-benet, A., Puigdefabregas, J., 2002. Influence of soil-surface types on the overall runoff of the Tabernas badlands (south-east Spain): field data and model approaches. *Hydrological Processes* 16 (13), 2621-2643.
- Cantón, Y., Solé-Benet, A., de Vente, J., Boix-Fayos, C., Calvo-Cases, A., Asensio, C., Puigdefabregas, J., 2011. A review of runoff generation and soil erosion across scales in semiarid south-eastern Spain. *Journal of Arid Environment* 75(12), 1254-1261.

- Casenave, A., Valentin, C., 1992. A runoff capability classification-system based on surface-features criteria in semiarid areas of West Africa. *Journal of Hydrology* 130 (1-4), 231-249.
- Casermeiro, M.A., Molina, J.A., Caravaca, M.T.D.L., Costa, J.H., Massanet, M.I.H., Moreno, P.S., 2004. Influence of scrubs on runoff and sediment loss in soils of Mediterranean climate. *Catena* 57 (1), 91-107.
- Cerdà, A., 1993. La infiltración en los suelos del País Valenciano. Factores y variaciones espacio-temporales. Universidad de Valencia. Departamento de Geografía. Tesis Doctoral.
- Cerda, A., Ibanez, S., Calvo, A., 1997. Design and operation of a small and portable rainfall simulator for rugged terrain. *Soil Technology* 11 (2), 163-170.
- Chamizo, S., Cantón, Y., Rodríguez-Caballero, E., Domingo, F., Escudero, A., 2012. Runoff at contrasting scales in a semiarid ecosystem: A complex balance between biological soil crust features and rainfall characteristics. *Journal of Hydrology* 452-453, 130-138.
- Chiverrell, R.C., Foster, G.C., Marshall, P., Harvey, A.M., Thomas, G.S.P., 2009. Coupling relationships: Hillslope-fluvial linkages in the Hodder catchment, NW England. *Geomorphology* 109(3-4), 222-235.
- Chorley, R.J., Kennedy, B.A., 1971. *Physical Geography: A Systems Approach*. Prentice Hall, pp. 370.
- Cohen, S., Willgoose, G.R., Hancock, G.R., 2008. Soil armouring and weathering: toward catchment-scale computational modelling. *IAHS-AISH Publication* 235, 167-174.
- Corell, A., 1998. Procesos de degradación y potencial de recuperación de los suelos en zonas de montaña mediterránea: gestión de las terrazas de cultivo abandonadas como medio para la conservación de suelos y agua. Memoria de proyecto de investigación. Caja Madrid, (Inédito).
- Costa, M., (1986): La vegetación en el País Valenciano, Universitat de València, Secretariado de Publicaciones, Valencia, pp. 246.
- Croke, J., Mockler, S., Fogarty, P., Takken, I., 2005. Sediment concentration changes in runoff pathways from a forest road network and the resultant spatial pattern of catchment connectivity. *Geomorphology* 68(3-4), 257-268.
- Davenport, D.W., Breshears, D.D., Wilcox, B.P., Allen, C.D., 1998. Viewpoint: Sustainability of pinon-juniper ecosystems - a unifying perspective of soil erosion thresholds. *Journal of Range Management* 51 (2), 231-240.
- de Boer, D.H., 1992. Hierarchies and spatial scale in process geomorphology: a review. *Geomorphology* 4, 303-318.
- de Vente, J. and Poesen, J., 2005. Predicting soil erosion and sediment yield at the basin scale: Scale issues and semi-quantitative models. *Earth-Science Reviews*, 71, 95-125.
- de Vente, J., Poesen, J., Arabkhedri, M., Verstraeten, G., 2007. The sediment delivery problem revisited. *Progress in Physical Geography* 31(2), 155-178.
- Dollar, E.S.J., James, C.S., Rogers, K.H., Thoms, M.C., 2007. A framework for interdisciplinary understanding of rivers as ecosystems. *Geomorphology* 89(1-2 SPEC. ISS.), 147-162.

- Dunkerley, D.L., Brown, K.J., 1995. Runoff and runoff areas in a patterned chenopod shrubland, arid western New South Wales, Australia: characteristics and origin. *Journal of Arid Environment*, 30(1), 41-55.
- Dunn, S.M., Freer, J., Weiler, M., Kirkby, M.J., Seibert, J., Quinn, P.F., Lischeid, G., Tetzlaff, D., Soulsby, C., 2008. Conceptualization in catchment modelling: Simply learning? *Hydrological Processes* 22(13), 2389-2393.
- Emmett, W.W., 1970. Hydraulics of overland flow on hillslopes. U S Geological Survey, Prof. Pap. 662-A.
- Farres, P., 1978. Role of time and aggregate size in crusting process. *Earth Surface Processes and Landforms* 3 (3), 243-254.
- Faulkner, H., 2008. Connectivity as a crucial determinant of badland morphology and evolution. *Geomorphology* 100, 91–103
- Faulkner, H., Alexander, R. W., Zukowskyj, P., 2008. Slope–channel coupling between pipes, gullies and tributary channels in the Mocatán catchment badlands, Southeast Spain. *Earth Surface Processes and Landforms* 33, 1242–1260.
- Fisher, S.G., Heffernan, J.B., Sponseller, R.A., Welter, J.R., 2007. Functional ecomorphology: Feedbacks between form and function in fluvial landscape ecosystems. *Geomorphology*, 89(1-2 SPEC. ISS.), 84-96.
- Fox, D.M., Bryan, R.B., 1999. The relationship of soil loss by interrill erosion to slope gradient. *Catena*, 38(3), 211-222.
- Francis, C.F., Thornes, J.B., 1990. Runoff hydrographs from three Mediterranean vegetation cover types. En: J.B. Thornes (Editor). *Vegetation and Erosion. Processes and environments*. Wiley. Chichester. 363-384.
- Freeze, R.A., Harlan, R.L., 1969. Blueprint for a physically-based, digitally-simulated hydrologic response model. *Journal of Hydrology* 9(3), 237-258.
- Fryirs, K.A., Brierley, G.J., Preston, N.J., Spencer, J., 2007. Catchment-scale (dis)connectivity in sediment flux in the upper Hunter catchment, New South Wales, Australia. *Geomorphology*, 84(3-4), 297-316.
- Gallart, F., Puigdefabregas, J., del Barrio, G., 1993. Computer simulation of high mountain terracettes as interaction between vegetation growth and sediment movement. *Catena* 20(6), 529-542.
- Galle, S., Ehrmann, M., Peugeot, C., 1999. Water balance in a banded vegetation pattern. A case study of tiger bush in western Niger. *Catena* 37(1-2), 197-216.
- Gerlach, T., 1967. Hillslope troughs for measuring sediment movement. *Rev. Geomorph. dyn.* 42, 197.
- Greene, R.S.B., Hairsine, P.B., 2004. Elementary processes of soil-water interaction and thresholds in soil surface dynamics: A review. *Earth Surface Processes and Landforms* 29 (9), 1077-1091.
- Harvey, A.M., 1978. Dissected alluvial fans in southeast Spain. *Catena* 5(2), 177-211.

- Harvey, A.M., 2001. Coupling between hillslopes and channels in upland fluvial systems: Implications for landscape sensitivity, illustrated from the Howgill Fells, northwest England. *Catena* 42(2-4), 225-250.
- Harvey, A.M., 2002. Effective timescales of coupling within fluvial systems. *Geomorphology* 44(3-4), 175-201.
- Harvey, A.M., 2012. The coupling status of alluvial fans and debris cones: A review and synthesis. *Earth Surface Processes Landforms* 37(1), 64-76.
- Hewlett, J.D., 1961. Watershed management. En: Report for 1961 SouthEastern Forest Experiment Station, US Forest Service, Asheville, N.C.
- Hewlett, J.D., Hibbert, A.R., 1967. Factors affecting the response of small watersheds to precipitation in humid areas. En: Sopper, W.E. y Lull, H.W. (Eds.), *Forest Hydrology*, Pergamon, Oxford, 275-290.
- HilleRisLambers, R., Rietkerk, M., van den Bosch, F., Prins, H.H.T., de Kroon, H., 2001. Vegetation pattern formation in semi-arid grazing systems. *Ecology* 82 (1), 50-61.
- Holden, J., Kirkby, M.J., Lane, S.N., Milledge, D.G., Brookes, C.J., Holden, V., McDonald, A.T., 2008. Overland flow velocity and roughness properties in peatlands. *Water Resource Research*, 44(6).
- Holling, C.S., 1992. Cross-scale morphology, geometry, and dynamics of ecosystems. *Ecological Monographs* 62 (4), 447-502.
- Hooke, J., 2003. Coarse sediment connectivity in river channel systems: a conceptual framework and methodology. *Geomorphology* 56, 79-94.
- Hooke, J.M., 2006. Human impacts on fluvial systems in the Mediterranean region. *Geomorphology* 79(3-4), 311-335.
- Hopp, L., McDonnell, J.J., 2009. Connectivity at the hillslope scale: Identifying interactions between storm size, bedrock permeability, slope angle and soil depth. *Journal of Hydrology*, 376(3-4), 378-391.
- Horton, R.E., 1933. The role of infiltration in the hydrologic cycle. *Transactions, American Geophysical Union* 14 (1), 446-460
- IGME, 1983. *Geología de España*. Libro Jubilar J.M. Ríos, Instituto Geológico y Minero de España, Madrid, pp. 237.
- Imeson, A.C., Perez-Trejo, F., Lavee, H., Calvo-Cases, A., 1994. Modelling and exploring the impact of climate change on ecosystem degradation, hydrology and land use along a transect across the Mediterranean. In: Troen, I. (Eds.), *Proceedings Copenhagen Symposium: Global Change: Climate Change and Climate Change Impacts*. European Commission, EUR 15921 EN, Copenhagen, pp. 173-185.
- Imeson, A.C., Cammeraat, L.H., Perez-Trejo, F., 1995. Desertification response units. En: Fantechi, R., Peter, D., Balabanis, P., Rubio, J.L. (Eds.), *Desertification in a European Context: Physical and Socio-economic Aspects*. Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg, pp. 263-277.

- Imeson, A.C., Prinsen, H.A.M., 2004. Vegetation patterns as biological indicators for identifying runoff and sediment source and sink areas for semi-arid landscapes in Spain. *Agriculture Ecosystems & Environment* 104 (2), 333-342.
- Iserloh, T. , Ries, J.B., Arnáez, J., Boix-Fayos, C., Butzen, V., Cerdà, A., Echeverría, M.T., Fernández-Gálvez, J., Fister, W., Geißler, C., Gómez, J.A., Gómez-Macpherson, H., Kuhn, N.J., Lázaro, R., León, F.J., Martínez-Mena, M., Martínez-Murillo, J.F., Marzen, M., Mingorance, M.D., Ortigosa, L., Peters, P., Regüés, D., Ruiz-Sinoga, J.D., Scholten, T., Seeger, M., Solé-Benet, A., Wengel, R., Wirtz, S., 2013. European small portable rainfall simulators: A comparison of rainfall characteristics. *Catena* 110, 100-112.
- Jaccard, P.,1912.The distribution of the flora in the alpine zone. *New Phytologist* 11, 37–50.
- James, A.L., Roulet, N.T., 2007. Investigating hydrologic connectivity and its association with threshold change in runoff response in a temperate forested watershed. *Hydrological Processes* 21(25), 3391-3408.
- Jencso, K.G., McGlynn, B.L., Gooseff, M.N., Wondzell, S.M., Bencala, K.E., Marshall, L.A., 2009. Hydrologic connectivity between landscapes and streams: Transferring reach- and plot-scale understanding to the catchment scale. *Water Resources Research* 45(4), 1-16.
- Kirkby, M. J., Baird, A.J., Diamond, S. M., Lockwood, J.G., McMahon, M.G., Mitchell, P.L., Shao, J., Sheehy, J.E., Thornes, J.B., Woodward, F.I., 1996. The MEDALUS slope catena model: A physically based process model for hydrology, ecology and land degradation interactions. En: Thornes, J.B., Woodward, F. (Editores) *Mediterranean Desertification and Land Use*. John Wiley, Chichester, UK. 303-354.
- Kirkby, M., 2002. Modelling the interactions between soil surface properties and water erosion. *Catena* 46 (2-3), 89-102.
- Kirkby, M.J., 2014. Do not only connect: A model of infiltration-excess overland flow based on simulation. *Earth Surface Processes and Landforms* 39(7), 952-963.
- Kirkby, M.J., Abrahart, R., McMahon, M.D., Shao, J., Thornes, J.B., 1998. MEDALUS soil erosion models for global change. *Geomorphology* 24(1), 35-49.
- Kirkby, M., Bracken, L., Reaney, S., 2002. The influence of land use, soils and topography on the delivery of hillslope runoff to channels in SE Spain. *Earth Surface Processes and Landforms* 27 (13), 1459-1473.
- Koch, K., Wenninger, J., Uhlenbrook, S., Bonell, M., 2009. Joint interpretation of hydrological and geophysical data: Electrical resistivity tomography results from a process hydrological research site in the Black Forest Mountains, Germany. *Hydrological Processes* 23(10), 1501-1513.
- Kutiel, P., Lavee, H., Ackermann, O., 1998. Spatial distribution of soil surface coverage on north and south facing hillslopes along a Mediterranean to extreme arid climatic gradient. *Geomorphology* 23 (2-4), 245-256.
- Lange, J., Greenbaum, N., Husary, S., Ghanem, M., Leibundgut, C., Schick, A.P., 2003. Runoff generation from successive simulated rainfalls on a rocky, semi-arid, Mediterranean hillslope. *Hydrological Processes* 17 (2), 279-296.

- Lavee, H., Poesen, J.W.A., 1991. Overland-flow generation and continuity on stone-covered soil surfaces. *Hydrological Processes* 5 (4), 345-360.
- Lavee, H., Kutiel, P., Segev, M., Benyamini, Y., 1995. Effect of surface roughness on runoff and erosion in a mediterranean ecosystem: the role of fire. *Geomorphology* 11(3), 227-234.
- Lavee, H., Imeson, A.C., Sarah, P., 1998. The impact of climate change on geomorphology and desertification along a Mediterranean-arid transect. *Land Degradation & Development* 9 (5), 407-422.
- Lavee, H., Calvo-Cases, A., Sarah, P., Boix-Fayos, C., Ben-Shmuel, M., Arnau-Rosalen, E., 2004. Lessons and Experience gained from 20 years of measuring soil erosion and related data in the Mediterranean: Future challenges and the way ahead. In: van Asselen, S., Boix-Fayos, C., Imeson, A.C. (Eds.), *Briefing Papers Of the second SCAPE workshop in Cinque Terre*. SCAPE, Amsterdam, pp. 23-36.
- Lázaro, R., Calvo-Cases, A., Lázaro, A., Molina, I., 2015. Effective run-off flow length over biological soil crusts on silty loam soils in drylands. *Hydrological Processes* 29(11), 2534-2544.
- Lehmann, P., Hinz, C., McGrath, G., Tromp-van Meerveld, H.J., McDonnell, J.J., 2007. Rainfall threshold for hillslope outflow: An emergent property of flow pathway connectivity. *Hydrology and Earth System Sciences* 11(2), 1047-1063.
- Lesschen, J. P., Schoorl, J.M., Cammeraat, L.H., 2009. Modelling runoff and erosion for a semi-arid catchment using a multi-scale approach based on hydrological connectivity. *Geomorphology* 109, 174-183
- Levin, S.A., 1992. The problem of pattern and scale in ecology. *Ecology* 73(6), 1943-1967.
- López-Bemúdez, F., Albadalejo, J., 1990. Factores ambientales de la degradación del suelo en el área mediterránea. En: Albadalejo, J., Stocking, M.A., Díaz, E. (Editores.), *Degradación y regeneración del suelo en condiciones ambientales mediterráneas*. CSIC-CEBAS, Murcia, pp. 15-46.
- Ludwig, J.A., Tongway, D.J., 2000. Viewing rangelands as landscape systems. En: Arnalds, O., Archer, S. (Editores.), *Rangeland Desertification. Advances in Vegetation Sciences*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 39–52.
- Ludwig, J.A., Tongway, D.J., Marsden, S.G., 1999. Stripes, strands or stipples: Modelling the influence of three landscape banding patterns on resource capture and productivity in semi-arid woodlands, Australia. *Catena* 37(1-2), 257-273.
- Ludwig, J.A., Eager, R.W., Bastin, G.N., Chewings, V.H., Liedloff, A.C., 2002. A leakiness index for assessing landscape function using remote sensing. *Landscape Ecology* 17(2), 157-171.
- Ludwig, J.A., Wilcox, B.P., Breshears, D.D., Tongway, D.J., Imeson, A.C., 2005. Vegetation patches and runoff-erosion as interacting eco-hydrological processes in semiarid landscape. *Ecology* 86, 288-297.
- Ludwig, J.A., Bastin, G.N., Chewings, V.H., Eager, R.W., Liedloff, A.C., 2007. Leakiness: A new index for monitoring the health of arid and semiarid landscapes using remotely sensed vegetation cover and elevation data. *Ecological Indicators* 7(2), 442-454.

- Maestre, F.T., Cortina, J., 2002. Spatial patterns of surface soil properties and vegetation in a Mediterranean semi-arid steppe. *Plant and Soil* 241 (2), 279-291.
- Martinez-Mena, M., Albaladejo, J., Castillo, V.M., 1998. Factors influencing surface runoff generation in a Mediterranean semi-arid environment: Chicamo watershed, SE Spain. *Hydrological Processes* 12 (5), 741-754.
- Martínez-Mena, M., Castillo, V., Albaladejo, J., (2001): Hydrological and erosional response to natural rainfall in a degraded semiarid area of South-East Spain. *Hydrological Processes* 15, 557-571.
- Mayor, A.G., Bautista, S., Small, E.E., Dixon, M., Bellot, J., 2008. Measurement of the connectivity of runoff source areas as determined by vegetation pattern and topography: a tool for assessing potential water and soil losses in drylands. *Water Resources Research* 44 (Art. No. W10423).
- McGarigal, K., Cushman S.A., Ene, E., 2012. FRAGSTATS v4: Spatial Pattern Analysis Program for Categorical and Continuous Maps. Computer software program produced by the authors at the University of Massachusetts, Amherst.
- McDonnell, J.J., Sivapalan, M., Vach, K., Dunn, S., Grant, G., Haggerty, R., Hinz, C., Hooper, R., Kirchner, J., Roderick, M.L., Selker, J., Weiler, M., 2007. Moving beyond heterogeneity and process complexity: A new vision for watershed hydrology. *Water Resources Research* 43(7).
- Michaelides, K., Chappell, A., 2009. Connectivity as a concept for characterising hydrological behavior. *Hydrological Processes* 23, 517–522.
- Miyashita, T., Amano, T., Yamakita, T., 2014. Effects of Ecosystem Diversity on Species Richness and Ecosystem Functioning and Services: A General Conceptualization (Chapter 2). En: Nakano, S., Yahara, T., Nakashizuka, T. (Editores), *Integrative Observations and Assessments*. Springer, Japan. 29-47
- Morin, J., Benyamini, Y., 1977. Rainfall infiltration into bare soils. *Water Resources Research* 13 (5), 813-817.
- Moustakas, N.C., Kosmas, C.S., Danalatos, N.G., Yassoglou, N., 1995. Rock fragments I. Their effect on runoff, erosion and soil properties under field conditions. *Soil Use and Management* 11 (3), 115-120.
- Neave, M., Rayburg, S., 2007. A field investigation into the effects of progressive rainfall-induced soil seal and crust development on runoff and erosion rates: The impact of surface cover. *Geomorphology*, 87(4), 378-390.
- Nicolau, J.M., Solé-Benet, A., Puigdefabregas, J., Gutierrez, L., 1996. Effects of soil and vegetation on runoff along a catena in semi-arid Spain. *Geomorphology* 14(4 SPEC. ISS.), 297-309.
- Nielsen, D.R., Wendroth, O., 2003. *Spatial and Temporal Statistics*. GeoEcology textbook. Catena Verlag GMBH, pp. 398.
- Noy-Meir, I., 1973. Desert Ecosystems: Environment and Producers. *Annual Review of Ecology and Systematics* 4, 25-51.
- Ollesch, G., Vacca, A., 2002. Influence of time on measurement results of erosion plot studies. *Soil and Tillage Research* 67, 23–39.

- O'Neill, R.V., DeAngelis, D.L., Waide J.B., Allen, T.F.H., 1986. A hierarchical concept of ecosystems. *Monographs in Population Biology* 23. Princeton University Press, pp. 253.
- O'Neill, R.V., Johnson, A.R., King, A.W., 1989. A hierarchical framework for the analysis of scale. *Landscape Ecology* 3(3-4), 193-205.
- Paola, C., Foufoula-Georgiou, E., Dietrich, W.E., Hondzo, M., Mohrig, D., Parker, G., Power, M.E., Rodriguez-Iturbe, I., Voller, V., Wilcock, P., 2006. Toward a unified science of the Earth's surface: Opportunities for synthesis among hydrology, geomorphology, geochemistry, and ecology. *Water Resources Research* 42(3).
- Pérez-Cueva, A., 1994. Atlas Climático de la Comunidad Valenciana 1961-1990, Generalitat Valenciana, Conselleria Obres Públiques i Transport. Col·leció Territori 4, Valencia, pp. 208.
- Phillips, J.D., 2003. Sources of nonlinearity and complexity in geomorphic systems. *Progress in Physical Geography*, 27(1), 1-23.
- Poesen, J., 1990. Erosion process research in relation to soil erodibility and some implications for improving soil quality. En: Albadalejo, J., Stocking, M.A., Díaz, E. (Eds.), *Soil Degradation and Rehabilitation in Mediterranean Environmental Conditions*. C.S.I.C., Murcia, pp. 159-170.
- Poesen, J., Ingelmo-Sanchez, F., 1992. Runoff and sediment yield from topsoils with different porosity as affected by rock fragment cover and position. *Catena* 19 (5), 451-474.
- Poesen, J., Lavee, H., 1994. Rock fragments in topsoils: significance and processes. *Catena* 23. 1-28.
- Poesen, J., Bunte, K., 1996. The effects of rock fragments on desertification processes in Mediterranean environments. En: Brant, J., Thornes, J.B. (Editors), *Mediterranean desertification and Land Use*. John Wiley & Sons, Ltd., Chichester. 247-269.
- Poesen, J., Ingelmo-Sanchez, F., Mucher, 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.
- Poesen, J.W., Torri, D., Bunte, K., 1994. Effects of rock fragments on soil erosion by water at different spatial scales: a review. *Catena* 23, 141-166.
- Poesen, J.W., van Wesemael, B., Bunte, K., Benet, A.S., 1998. Variation of rock fragment cover and size along semiarid hillslopes: a case-study from southeast Spain. *Geomorphology* 23 (2-4), 323-335.
- Poesen, J., De Luna, E., Franca, A., Nachtergaele J., Govers, G., (1999). Concentrated flow erosion rates as affected by rock fragment cover and initial soil moisture content. *Catena* 36, 315-329.
- Porporato, A., Odorico, P.D., Laio, F., Ridolfi, L., Rodriguez-Iturbe, I., 2002. Ecohydrology of water-controlled ecosystems. *Advances in Water Resources* 25, 1335-1348.
- Post, D.M., Doyle, M.W., Sabo, J.L., Finlay, J.C., 2007. The problem of boundaries in defining ecosystems: A potential landmine for uniting geomorphology and ecology. *Geomorphology*, 89(1-2 SPEC. ISS.), 111-126.
- Puigdefabregas, J., 2005. The role of vegetation patterns in structuring runoff and sediment fluxes in drylands. *Earth Surface Processes and Landforms* 30 (2), 133-147.

- Puigdefábregas, J., Sánchez, G., 1996. Geomorphological implications of vegetation patchiness on semi-arid slopes. En: Anderson, M.G., Brooks, S.M. (Editores), *Advances in hillslope processes*. John Wiley and Sons, London, 1027-1060.
- Puigdefabregas, J., Sanchez, G., 1996. Vegetacion dispersa y flujos de vertiente en clima semiarido. En: d'Anglade, G., Valcarlos, P. (Editores), *IV Reunión de Geomorfología*. Sociedad Española de Geomorfología, A Coruña. 375-392.
- Puigdefabregas, J., del Barrio, G., Boer, M.M., Gutierrez, L., Sole, A., 1998. Differential responses of hillslope and channel elements to rainfall events in a semi-arid area. *Geomorphology* 23 (2-4), 337-351.
- Puigdefabregas, J., Sole, A., Gutierrez, L., del Barrio, G., Boer, M., 1999. Scales and processes of water and sediment redistribution in drylands: results from the Rambla Honda field site in Southeast Spain. *Earth-Science Reviews* 48 (1-2), 39-70.
- Ramos, J., Calvo, A., Pérez Badía, R. (2001): Relaciones entre la erosibilidad del suelo y la vegetación en la montaña del Norte de Alicante. *Actas III Congreso Forestal Español*. Granada
- Renschler, C.S., Doyle, M.W., Thoms, M., 2007. Geomorphology and ecosystems: Challenges and keys for success in bridging disciplines. *Geomorphology* 89(1-2 SPEC. ISS.), 1-8.
- Rey Salgado, J., Fumanal García, M.P., Ferrer García, C., Viñals Blasco, M.J., Yébenes, A., 1993. Correlación de las unidades morfológicas cuaternarias (dominio continental y plataforma submarina) del sector Altea-la Vila Joiosa, País Valenciano (España). *Cuadernos de Geografía*,54, 249-267.
- Rieke-Zapp, D., Poesen, J., Nearing, M.A., 2007. Effects of rock fragments incorporated in the soil matrix on concentrated flow hydraulics and erosion. *Earth Surface Processes Landforms* 32(7), 1063-1076.
- Rietkerk, M., Boerlijst, M.C., van Langevelde, F., HilleRisLambers, R., van de Koppel, J., Kumar, L., Prins, H.H.T., de Roos, A.M., 2002. Self-organization of vegetation in arid ecosystems. *American Naturalist* 160 (4), 524-530.
- Rivas Martínez, S.,1985. *Biogeografía y Vegetación*, Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Madrid, pp.. 103.
- Rodríguez-Caballero, E., Cantón, Y., Jetten, V., 2015. Biological soil crust effects must be included to accurately model infiltration and erosion in drylands: An example from Tabernas Badlands. *Geomorphology* 241, 331-342.
- Romero-Díaz, A., Cammeraat, L.H., Vacca, A., Kosmas, C., 1999. Soil erosion at three experimental sites in the Mediterranean. *Earth Surface Processes and Landforms* 24, 1243–1256.
- Roth, C.H., 2004. A framework relating soil surface condition to infiltration and sediment and nutrient mobilization in grazed rangelands of northeastern Queensland, Australia. *Earth Surface Processes and Landforms* 29 (9), 1093-1104.
- Roth, C.H., Helming, K., 1992. Surface Seal Properties, Runoff Formation and Sediment Concentration As Related to Rainfall Characteristics and the Presence of Already Formed Crusts. *Soil Technology* 5 (4), 359-368.

- Sánchez, G., Puigdefabregas, J., 1994. Interactions of plant growth and sediment movement on slopes in a semi-arid environment. *Geomorphology* 9(3), 243-260.
- Schoorl, J.M., Veldkamp, A., Bouma, J., 2002. Modeling water and soil redistribution in a dynamic landscape context. *Soil Science Society of America Journal* 66, 1610–1619.
- Schroder, B., Seppelt, R., 2006. Analysis of pattern-process interactions based on landscape models- Overview, general concepts, and methodological issues. *Ecological Modelling*, 199(4), 505-516.
- Schumm, S.A., 1979. *Geomorphic Thresholds: The Concept and Its Applications*. Transactions of the Institute of British Geographers, New Series 4 (4), 485-515.
- Seppelt, R., Müller, F., Schröder, B., Volk, M., 2009. Challenges of simulating complex environmental systems at the landscape scale: A controversial dialogue between two cups of espresso. *Ecological Modelling* 220(24), 3481-3489.
- Shannon, C.E., Weaver W, 1949. *The mathematical theory of communication*. University Illinois Press, Urbana, IL.
- Sharmeen, S., Willgoose, G.R., 2006. The interaction between armouring and particle weathering for eroding landscapes. *Earth Surface Processes Landforms* 31(10), 1195-1210.
- Sharmeen, S., Willgoose, G.R., 2007. A one-dimensional model for simulating armouring and erosion on hillslopes: 2. Long term erosion and armouring predictions for two contrasting mine spoils. *Earth Surface Processes Landforms* 32(10), 1437-1453.
- Simpson, E.H., 1949. Measurement of Diversity. *Nature* 163, 688-688.
- Sivapalan, M., 2009. The secret to 'doing better hydrological science': Change the question! *Hydrological Processes* 23(9), 1391-1396.
- Soriano-Soto, M.D., Calvo-Cases, A., Boix-Fayos, C., Imeson, A.C., 1995. Effect of climate on some soil properties and related thresholds controlling the erosional response of soils in a limestone area. *Phys. Chem. Earth*, 20(3-4), 281-286.
- Soriano, M.D., Calvo, A., Boix, C., Pons, V., 1996. Variaciones en las propiedades de los suelos y su agregación en un transecto altitudinal de la provincia de Alicante. *Cuaternario y Geomorfología* 10, 45-58.
- Tetzlaff, D., Soulsby, C., Bacon, P.J., Youngson, A.F., Gibbins, C., Malcolm, I.A., 2007. Connectivity between landscapes and riverscapes - A unifying theme in integrating hydrology and ecology in catchment science? *Hydrol. Processes*, 21(10), 1385-1389.
- Tetzlaff, D., McDonnell, J.J., Uhlenbrook, S., McGuire, K.J., Bogaart, P.W., Naef, F., Baird, A.J., Dunn, S.M., Soulsby, C., 2008. Conceptualizing catchment processes: Simply too complex? *Hydrological Processes* 22(11), 1727-1730.
- Thornes, J.B., Shao, J.X., Diaz, E., Roldan, A., McMahon, M., Hawkes, J.C., 1996. Testing the MEDALUS hillslope model. *Catena* 26(3-4), 137-160.
- Tongway, D., Hindley, N., 2004. Landscape function analysis: A system for monitoring rangeland function. *African Journal of Range & Forage Science* 21(2), 109-113.

- Troch, P.A., Carrillo, G.A., Heidbchel, I., Rajagopal, S., Switanek, M., Volkmann, T.H.M., Yaeger, M., 2009. Dealing with landscape heterogeneity in watershed hydrology: A review of recent progress toward new hydrological theory. *Geography Compass* 3(1), 375-392.
- Turner, M.G., 1989. Landscape ecology: the effect of pattern on process. *Annual Review of Ecology and Systematics* 20, 171-197.
- Usón, A., Ramos, M. C., 2001. An improved rainfall erosivity index obtained from experimental interrill soil losses in soils with a Mediterranean climate. *Catena* 43, 293–305.
- Valentin, C., 1994. Surface Sealing As Affected by Various Rock Fragment Covers in West-Africa. *Catena* 23 (1-2), 87-97.
- Valentín, C., D'Herbés, J.M., 1999. Niger tiger bush as a natural water harvesting system. *Catena* 37(1-2), 231-256.
- Verheijen, F.G.A., Cammeraat, L.H., 2007. The association between three dominant shrub species and water repellent soils along a range of soil moisture contents in semi-arid Spain. *Hydrological Processes* 21(17), 2310-2316.
- von Bertalanffy, L., 1973. *Théorie générale des systèmes*. Dunod.
- Wainwright, J., 2006. Degrees of separation: Hillslope-channel coupling and the limits of palaeohydrological reconstruction. *Catena* 66, 93 – 106.
- Wainwright, J., Parsons, A.J., Abrahams, A.D., 2000. Plot-scale studies of vegetation, overland flow and erosion interactions: case studies from Arizona and New Mexico. *Hydrological Processes* 14 (16-17), 2921-2943.
- Wilcox, B.P., Breshears, D.D., Allen, C.D., 2003. Ecohydrology of a resource-conserving semiarid woodland: Effects of scale and disturbance. *Ecological Monographs* 73 (2), 223-239.
- Wu, J., David, J.L., 2002. A spatially explicit hierarchical approach to modeling complex ecological systems: Theory and applications. *Ecological modelling* 153(1-2), 7-26.
- Yair, A., 1983. Hillslope hydrology, water harvesting and areal distribution of some ancient agricultural systems, northern Negev, Israel. *Journal of Arid Environments* 6, 283-301.
- Yair, A., Klein, M., 1973. The influence of surface properties on flow and erosion processes on debris covered slopes in an arid area. *Catena* 1, 1-18.
- Yair, A., Lavee, H., 1985. Runoff generation in arid and semi-arid zones. In: Anderson, M.G., Burt, T.P. (Eds.), *Hydrological Forecasting*. John Wiley and Sons, Ltd., 183-220.
- Yair, A., Raz-Yassif, 2004. Hydrological processes in a small arid catchment: scale effects of rainfall and slope length. *Geomorphology* 61 (1-2), 155-169.
- Yarrow, M.M., Salthe, S.N., 2008. Ecological boundaries in the context of hierarchy theory. *Biosystems*, 92(3), 233-244.
- Zehe, E., Sivapalan, M., 2009. Threshold behaviour in hydrological systems as (human) geoecosystems: manifestations, controls, implications. *Hydrology and Earth System Sciences* 13, 1273-1297.

Zeng, X.D., Zeng, X.B., Shen, S.S.P., Dickinson, R.E., Zeng, Q.C., 2005. Vegetation-soil water interaction within a dynamical ecosystem model of grassland in semi-arid areas. *Tellus Series B-Chemical and Physical Meteorology* 57 (3), 189-202.