



**LOS EVENTOS EXTREMOS DE PRECIPITACIÓN,
LA VARIABILIDAD DEL CLIMA Y LA EROSIÓN DEL SUELO.
REFLEXIONES ANTE EL CAMBIO DEL CLIMA
EN LOS SISTEMAS MEDITERRÁNEOS**

Extreme rainfall events, climate variability and soil erosion. Some comments related to Climate Change in Mediterranean environments

J.C. González-Hidalgo, M. de Luis Arrillaga, J.L. Peña Monné

Departamento de Geografía, Universidad de Zaragoza, 50009, España

Dirección de contacto: José Carlos González-Hidalgo, Departamento de Geografía, Universidad de Zaragoza, Plaza S. Francisco sn. 50009, Zaragoza, España. E-mail: jcgh@posta.unizar.es

Resumen: Los autores presentan una reflexión sobre el fenómeno de los eventos extremos pluviales en el marco del Cambio del Clima y discuten su relación con la concentración de la erosión en ambientes de clima mediterráneo. De la revisión bibliográfica realizada se concluye que más de la mitad del suelo erosionado al año se produce en tan sólo tres eventos pluviales, que además no tienen por qué coincidir con los máximos pluviales absolutos. Esta concentración de la erosión anual parece que se puede rastrear también en escalas supra anuales. La coincidencia de los resultados procedentes de ambientes distintos, métodos de campo diferentes, y condiciones pluviales diferenciadas permite sugerir que las áreas de clima mediterráneo están sometidas a una extremada concentración de la erosión y que la interpretación de los valores promedio anuales debe ser sopesada con cautela. Los autores reflexionan sobre estos hechos, discutiendo las actuales interpretaciones de la interacción frecuencia-magnitud, y su imbricación sobre el cambio de la variabilidad del clima y el cambio climático.

Palabras clave: Variabilidad del clima. Precipitación. Suceso Extremo. Erosión. Mediterráneo.

Abstract: We discuss about extreme rainfall events under Climate Change hypothesis illustrated by mean of soil erosion under mediterranean conditions. According scientific literature we concluded that more than half of annual erosion is produced only in three events, not necessarily coinciding some time with absolute rainfall extreme events. Such concentration is observed also at supra annual scales. The coincidence of different results from diverse conditions suggest that mediterranean landscapes are under extreme concentrated erosion processes and annual mean value (annual rate) should be cautiously used. We discuss such evidences under magnitude-frequency relationship reinterpreted, and its implications with climatic variability and climate change.

Keywords: Climate variability. Rainfall. Extreme events. Erosion. Mediterranean landscapes.



J.C. González-Hidalgo, M. de Luis Arrillaga, J.L. Peña Monné (2005) Los eventos extremos de precipitación, la variabilidad del clima y la erosión del suelo. Reflexiones ante el cambio del clima en los sistemas mediterráneos. *Rev. C. & G.*, 19 (1-2), 49-62.

1. Introducción

Todo suceso que se aleja del promedio es por definición menos probable que ocurra. En ocasiones, el concepto de “menos probable” puede ser

sustituido por “suceso extremo” y supone la superación de un umbral (Schumm, 1980; Wigley, 1985). Su definición en ocasiones es sencilla (como los caudales que desbordan un canal, la relación entre el esfuerzo normal y cortante, la racha seca

que agosta una planta), mientras en otras no, pues por definición son sucesos raros (Palmer y Ralsanen, 2002). Más aún, lo que se denomina suceso extremo en una región puede ser absolutamente normal en otra, y parece claro que tanto la naturaleza como la sociedad están adaptadas a sus promedios en mayor medida que a los sucesos extremos, sean éstos cuales sean. Las lluvias torrenciales de octubre del 2000 alcanzaron 500 mm en 24 horas en Fredes, provincia de Castellón; al mismo tiempo, en las Cinco Villas de Aragón, el mismo evento produjo 50 mm en 24 horas con efectos completamente diferentes: los campos se anegaron, las carreteras se cortaron, hubo pérdida de cosechas, aislamiento de poblados de colonización, declaración de zona catastrófica, etc.

El estudio de los eventos extremos es un aspecto muy tratado en geomorfología e hidrología para identificar su frecuencia y su magnitud a través de los períodos de retorno (Ahnert, 1987; De Ploey *et al.*, 1991; Lewis, 1992). En particular son muy abundantes los trabajos sobre la precipitación extrema diaria por sus implicaciones directas en los procesos geomorfológicos (Gallart, 1995; Wainwright, 1996; Mulligan, 1998; Pagliara *et al.*, 1998; Puigdefábregas y Mendizábal, 1998; Nyberg y Rapp, 1998). No obstante su estudio es uno de los aspectos más debatidos dentro de la hipótesis del Cambio del Clima (Kieffer y Bois, 1997; White *et al.*, 1997; Bradley, 1998; Pagliara *et al.*, 1998, McGuffie *et al.*, 1999; Abbs, 1999; Palmer y Ralsanen, 2002), pues parece claro que el impacto ecológico y socioeconómico del clima se siente principalmente por los sucesos extremos.

2. Sucesos extremos y Cambio del Clima

Los sucesos extremos han recibido una atención creciente durante los últimos años por las pérdidas humanas que han provocado y el incremento exponencial del valor de la destrucción de los bienes asociados a ellos (Easterling *et al.*, 2000). Pero esta atención plantea una serie de preguntas sin respuestas claras: *¿realmente están aumentando los sucesos extremos o simplemente es una sensación percibida por un tratamiento mayor y catastrófica de los medios de comunicación?*, *¿acaso ambos hechos son reales?*, *¿son los sucesos extremos parte de la variabilidad del clima?*, o por el

contrario ¿se relacionan con otras causas, representan algo no experimentado con anterioridad y pudieran ser un signo de que el clima está cambiando? (Chagnon *et al.*, 1997 y 2000; Trenberth y Owen, 1999).

Los modelos generales han explorado los cambios de los sucesos extremos en diferentes escenarios (Meehl *et al.*, 2000), incluyendo la variabilidad diaria de las precipitaciones extremas (Zwiers y Kharin, 1998; McGuffie *et al.*, 1999), los patrones de lluvias torrenciales (Bhaskharan y Mitchell, 1998), las rachas secas y húmedas (McGuffie *et al.*, 1999), etc., y han indicado un aumento de las precipitaciones extremas, tanto en la escala global (Zwiers y Kharin, 1998) como regional (Hennessy *et al.*, 1997; McGuffie *et al.*, 1999). Sin embargo tales resultados deben tomarse con cautela pues los problemas de resolución espacial de los modelos no se han resuelto aún y se reconoce que los cambios en las lluvias extremas parecen depender de factores estrictamente locales (Bhaskharan y Mitchell, 1998; González-Hidalgo *et al.*, 2001). Respecto a los extremos de precipitación, el informe IPCC 2001 (Houghton *et al.*, 2001) indica: *“en variables como la precipitación, no ajustadas por lo general a distribuciones normales, el análisis es complejo. Los cambios de los valores medios anuales pueden venir acompañados de cambios en la frecuencia de las lluvias o de pequeños cambios de la forma de su distribución”*. En resumen, los sucesos extremos son aspectos fundamentales en el estudio del cambio del clima, pues la alteración de su frecuencia puede estar oculta en variaciones mínimas de los promedios.

Groisman *et al.* (1999) han demostrado que manteniendo la distribución de frecuencias de las precipitaciones, un cambio del 10% en la media anual enmascara un incremento de sucesos extremos. En consecuencia, la detección de ligeras modificaciones en las precipitaciones suele venir acompañada por lo general de un aumento de precipitaciones extremas (Karl *et al.*, 1995). Los análisis regionales confirman tales patrones en EEUU (Karl y Knight, 1998; Kunkel, 2003), este y noreste de Australia (Plummer *et al.*, 1999; Suppiah y Hennessy, 1998), Japón (Iwashima y Yamamoto, 1993), en las lluvias de invierno del Reino Unido (Osborn *et al.*, 2000), en Noruega, sur de Canadá, Sudáfrica, Nordeste de Brasil, sur de China y la antigua URSS (Groisman *et al.*, 1999) etc. Pero la rela-

ción contraria (incremento de sucesos extremos donde se han constatado tendencias de lluvias anuales negativas) también ha sido detectada tanto en el hemisferio sur (Nicholson, 1993; Tarhule y Woo, 1998; Plummer *et al.*, 1999), como en el hemisferio norte (Groisman *et al.*, 1999); e incluso la situación se complica cuando la tendencia anual de la precipitación así como la de los sucesos extremos es negativa, pero éstos ofrecen una tendencia positiva en el porcentaje que representan sobre los totales anuales (De Luís, 2000; González-Hidalgo *et al.*, 2003 y 2004 b). Por todo ello no existen conclusiones definitivas sobre este aspecto (Trenberth y Owen, 1999; Nicholls y Murray, 1999; Folland *et al.*, 1999), aunque todo apunta a reconocer el aumento de los sucesos extremos como indicadores del Cambio del Clima (Esteban Parra *et al.*, 1998), y a que en general parece que se está produciendo el acortamiento de los períodos de retorno de los extremos de 20 años a un período de 10 años (Meehl *et al.*, 2000).

Sin embargo existen diversos problemas en estos análisis (Hershfield, 1977). En primer lugar, la propia definición de evento pluvial extremo es algo discutido y la selección de los mismos varía entre valores absolutos diarios que superan un umbral (Yu y Neil, 1991; Karl *et al.*, 1995), percentiles (Osborn *et al.*, 2000; Brunetti *et al.*, 2000) y los máximos diarios (Iwashima y Yamamoto, 1993; Suppiah y Hennessy, 1998; De Luís, 2000), lo que dificulta la comparación de los resultados reflejados en la bibliografía. Un segundo problema se relaciona con el dato disponible: por lo general en la mayor parte de las series los registros son diarios y ocultan más de un evento dentro del mismo día o sus diferentes intensidades. Si bien en los últimos años los sistemas automatizados de información hidrológica (SAIH en España) solucionan esta dificultad, las series de registros aún son muy cortas en su longitud y por ello los análisis de estos fenómenos continuarán durante algunos años realizándose a partir de datos diarios, como se manifiesta en España en los trabajos efectuados en la vertiente mediterránea (Martín Vide, 1984; Romero *et al.*, 1998, 1999), en Cataluña (Lana *et al.*, 1995), la Región de Murcia (Erena y Rincón, 1998), Comunidad Valenciana (Martín-Vide, 1994; Gil-Olcina, 1986; De Luís, 2000; Egozcue y Ramis, 2001; González-Hidalgo *et al.*, 2003), y en Aragón (Beguiría y Lorente, 1999; García Ruiz *et al.*, 2000 y 2002; González-Hidalgo *et al.*, 2004 b).

El eventual cambio detectado de los sucesos extremos en las precipitaciones de diversas partes del mundo tiene además diferentes implicaciones. Entre ellas destacan dos de modo directo: sus efectos en la evolución de las tendencias generales de precipitación (Iwashima y Yamamoto, 1993; Yu y Neil, 1993; Karl *et al.*, 1995; Suppiah y Hennessy, 1998; González-Hidalgo *et al.*, 2003) y sus efectos sobre las variaciones de la escorrentía superficial (Milly *et al.*, 2002), de la que se han detectado evidencias en América del Norte (Lins y Slack, 1999; Groisman *et al.*, 1999), América del Sur (García y Vargas, 1997; Genta *et al.*, 1998) y Rusia (Georgievsky *et al.*, 1996); aunque la relación no es sencilla, y Groisman *et al.* (1999) han demostrado que el aumento de la escorrentía superficial en EEUU es tres veces superior al aumento observado en los valores de precipitación promedio, mientras por el contrario en Nueva Zelanda las observaciones indican que el incremento de la varianza y la tendencia de la escorrentía superficial no son significativas estadísticamente. Es decir, la relación exacta entre la escorrentía superficial y los sucesos extremos de lluvia no tiene que convertirse directamente en valores extremos de la escorrentía superficial (Lins y Slack, 1999).

3. Los eventos extremos de precipitación en las áreas de clima mediterráneo

Los resultados de los diferentes informes del Cambio del Clima (IPCC) sugieren que las áreas que sufrirán de modo más adverso el cambio del clima son las zonas de transición, y dentro de estas, especialmente, las de clima mediterráneo (Lavorel *et al.*, 1998). Los distintos Modelos Generales coinciden entre sí al asignar predicciones que conjugaran el descenso de los totales anuales y el incremento de la variabilidad de las precipitaciones (Houghton *et al.*, 2001), confirmada en estudios subregionales durante el siglo XX (Maheras, 1988; Maheras y Kolyva-Machera, 1990; Wheeler y Martín-Vide, 1992; Romero *et al.*, 1998, 1999). La importancia de tales cambios, caso de producirse, es que tendrían lugar en unos ambientes en los que el agua es un recurso escaso, limitante, que determina muchos procesos de los sistemas naturales y su pervivencia, así como numerosas actividades humanas.

Las precipitaciones del tipo mediterráneo se caracterizan por su escasez, su torrencialidad y su extrema variabilidad espacial y temporal (Sumner *et al.*, 1993; Quereda, 1994; Romero *et al.*, 1998, 1999), que conjunta o aisladamente se solapan en el tiempo con períodos secos y definen el fenómeno de la aridez. Los estudios regionales proporcionan una idea de sus magnitudes (Romero *et al.*, 1992; López Bermúdez y Romero, 1993; Poesen y Hooke, 1997), en los que no escapa el hecho de que precipitaciones varias veces centenarias son algo habitual en intervalos inferiores a las 24 horas. Ejemplos recientes ilustran estos comentarios: en la ciudad de Alicante durante el 30 de septiembre de 1997 en menos de tres horas precipitaron más de 160 mm, en algunos observatorios de la comarca de la Safor el mismo día se recogieron más de 500 mm, y más de 800 mm el 3 de Noviembre de 1987 (Armengot-Serrano, 1994). Más aún, estudios de detalle sugieren que el máximo diario estimado de 24h en el retorno de 20 años supera 100 mm prácticamente en todo el territorio de la Comunidad Valenciana (De Luís, 2000).

Por otra parte, el grado de concentración de la precipitación anual es sumamente elevado en estos ambientes y no es raro que un simple evento de lluvia pueda alcanzar valores comparables a los totales mensuales, de tal manera que los valores estacionales pueden ocultar realmente la influencia de un corto número de días de lluvia (Delitala *et al.*, 2000). Por ejemplo, en la Comunidad Valenciana los 10 máximos anuales diarios de la precipitación representan, en promedio, más del 50% de la precipitación anual (De Luís, 2000; González-Hidalgo *et al.*, 2001), y en el valle del Ebro los 12 máximos mensuales promedio al menos suponen mensualmente más del 35-40% (González-Hidalgo *et al.*, 2004 b). En consecuencia cualquier tipo de cambio en las precipitaciones, no ya en sus valores medios sino en un corto número de días, se puede convertir en un proceso de la máxima relevancia que llegaría a afectar tanto a los sistemas naturales como a las actividades humanas (Waylen *et al.*, 1996).

4. Extremos pluviales y procesos geomorfológicos

La concentración de la lluvia en un reducido número de eventos es la causa principal de la concentración de la erosión en el tiempo, fenómeno

más que notable en áreas de clima mediterráneo (Diodato, 2004). Pero además los valores de concentración de lluvia diaria y los valores de su tendencia dificultan el uso de modelos paramétricos (USLE y sus modificaciones) en los que el factor lluvia se toma como el valor promedio de la serie de datos. Los intentos de ponderar la variabilidad interanual en el índice de Oliver (1980), o el índice de concentración diaria de precipitaciones propuesto por Martín Vide (1984), ambos analizados en la Comunidad Valenciana por De Luís *et al.* (1996), así como los intentos desarrollado por Usón y Ramos (2001), y Mannaerst y Gabriels (2000), quizá sugieran caminos de investigación que deberían ser desarrolladas con mayor detalle, especialmente en ambientes como el estudiado.

Más aún, en presencia de sucesos pluviales extremos pueden desencadenarse otros procesos como las avenidas, las inundaciones y los deslizamientos de ladera (Diodato, 2004). Es notable, por ejemplo, la coincidencia de umbrales detectados en la franja litoral mediterránea de la Península Ibérica de los deslizamientos en masa (La Roca, 1991), las inundaciones catastróficas (Llasat y Puigserver, 1994) y el incremento de la escorrentía en vegetación arbustiva (De Luís *et al.*, 2001 y 2003; González-Hidalgo *et al.*, 2004 a), semejantes a los descritos por Crosta (1998) en la Italia septentrional, y todos ellos localizados en torno a los 150-200 mm de precipitación en 24 horas.

Por último, al analizar los sucesos extremos en el área mediterránea, y especialmente en el litoral español, debe además considerarse que los factores de su génesis acentúan el carácter local de su aparición (Camarasa, 1993; Martín-Vide, 1994). El entorno del Mediterráneo, particularmente la costa este peninsular, se encuentra en uno de los sectores con mayor densidad de ciclogénesis del mundo (Petterssen, 1956), extremadamente móviles en el espacio y muy dinámicas en su desarrollo interno (Sharon, 1972; Yair y Lavee, 1985), que se manifiestan sobre extensiones “pequeñas” que oscilan entre los 10 y los 50 km² (Camarasa, 1993). El resultado de esta situación es la extrema variabilidad espacial y temporal de las precipitaciones y en consecuencia de los eventos extremos.

Pero pese a los comentarios precedentes, las investigaciones de los efectos de la variabilidad del clima (léase de los sucesos extremos) en la geomorfología de laderas no son muy abundantes

(Mulligan, 1998). A su baja frecuencia se une que las instalaciones de campo son generalmente desbordadas (Torri *et al.*, 1999; Coppus y Imeson, 2002), y en el caso de simulaciones de procesos tanto la intensidad de precipitación como su duración se refieren generalmente a eventos normales (15-45 minutos y 45-60 mm/h respectivamente, pero véase Croke *et al.*, 1999 en una excepción). Por todo ello, la simulación de los extremos podría ser un medio eficaz para conocer los efectos de las tendencias detectadas sobre los datos empíricos, bien en el caso de que hayan modificado su frecuencia (Bergkamp *et al.*, 1999), o bien porque determinados valores extremos definen umbrales en la naturaleza (De Luís *et al.*, 2003; González-Hidalgo *et al.*, 2004 a). No obstante, las simulaciones de lluvia presentan numerosos problemas (tamaño de la gota de lluvia, energía cinética liberada, extrapolación del espacio simulado a la realidad, etc), por lo cual deberían ser realizadas con todas las precauciones y cautelas indicadas por Coppus y Imeson (2002), quienes muestran su escepticismo.

5. La concentración de la erosión en el tiempo

En ambientes con precipitaciones irregulares, la concentración de la erosión en el tiempo es una clara manifestación de la variabilidad del clima. La revisión de los datos diarios publicados en trabajos previos permite acercarnos a este fenómeno en los ambientes mediterráneos, no sin mencionar dos dificultades. En primer lugar que cada vez se publican menos resultados del seguimiento de parcelas en el campo, y en segundo lugar que en los trabajos se recogen únicamente los datos globales o resumidos (no desglosados en el día a día). Por ello, la recopilación de datos que se ofrece no trata de ser exhaustiva, sino de dar una visión general de la situación actual de los sistemas mediterráneos.

En cada caso especificaremos las condiciones generales del lugar según las indicaciones de los autores, los métodos de campo y los valores de concentración de erosión a partir de los datos aportados en la publicación correspondiente. Los datos se expresan como porcentaje de suelo erosionado en los tres eventos máximos (acumulados) del período analizado. En la serie de tablas adjuntas (Tabla 1, 2 y 3) la clave (1) identifica el sedimento

producido durante el máximo día, (1+2) es la suma acumulada de los dos máximos anuales, y (1+2+3) la suma de los tres máximos anuales. En el caso de datos procedentes de cuencas el valor es el de la exportación total relacionada con la superficie de la cuenca. Se incluye el total de sedimento recogido en cada caso para la eventual reconstrucción de los valores diarios, así como algunos datos procedentes de ambientes no mediterráneos.

Como se puede comprobar (Tabla 1), los valores porcentuales provienen de cantidades de sedimento sumamente variables, y su comparación directa no es posible por los distintos métodos de campo, la dependencia espacial del fenómeno, el diferente tipo de vegetación, la cantidad de precipitación (no mostrada), etc. No obstante, la sistemática concentración de los valores anuales de suelo erosionado en tres días es más que evidente y supone cuando menos la mitad del total anual, con independencia de la situación peculiar del estudio que se trate, llegando a valores superiores al 75% del total de la erosión anual en numerosos casos.

Las magnitudes absolutas diarias varían de modo notable. Así, Imeson (1983) describe pérdidas entre 117 y 504 g m⁻², Bautista (1999) cita máximos diarios entre 8.7 y 191.6 g m⁻², y González-Hidalgo (1996) de 500 g m⁻². Superiores son los datos aportados por Albaladejo y Stocking (1989) con 1120 g m⁻² en la máxima tormenta, y Sánchez (1997) presenta el máximo del que tenemos noticia, obtenido en parcelas USLE en el sur de la provincia de Alicante durante Noviembre de 1987, cuando dos eventos consecutivos no solamente produjeron el 74% de todo el suelo erosionado durante 9 años, sino que el evento máximo generó pérdidas superiores a los 5000 g m⁻² de suelo en menos de 24 horas.

A su vez, aunque no es objeto de esta reflexión, la pérdida del suelo debe ponerse en el contexto de la propia tormenta que la origina, pues el sedimento desciende progresivamente desde el comienzo de la lluvia (Poesen *et al.*, 1999) “agotando el suelo disponible”. Recientes experiencias de lluvia torrencial simulada han permitido observar que solamente en los primeros 20 minutos (equivalente a 50 mm de lluvia acumulada) ya se habían exportado 211 g m⁻² de suelo sobre un total de 842 g m⁻² obtenidos tras cuatro horas de lluvia intensa (González-Hidalgo *et al.*, 2004 a). Este hecho expresa la idea de que gran parte de la precipitación

Tabla 1. Porcentaje de erosión acumulada anual en los tres máximos eventos.
Table 1. Three maximum daily erosion events accumulated (in %).

Tratamiento	Murcia (a)			Murcia (b)			Elche (c)																				
	A	B	C	Control						Surco						Terraza											
Año				1984	1985	1986	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991
1	76	37	54	28	52	48	79	58	85	41	88	82	100	63	53	86	37	83	50	100	64	52	81	51	91	74	100
1+2	84	71	83	55	77	86	93	89	99	74	93	93	—	95	90	99	73	92	82	—	81	95	98	80	95	85	—
1+2+3	91	85	95	55	93	90	97	96	99	91	95	99	—	97	97	99	92	95	89	—	97	98	99	96	97	92	—
Total g m ⁻²	1464	159	127	8	233	199	19	95	2887	99	178	25	4	59	2455	821	128	150	15	1	8	3554	964	81	195	32	6

- (a) Murcia, SE Península Ibérica. Clima semiárido, precipitación anual 200-250 mm, ETPanual > 1400 mm. Tres minicuecas (A, B, C) de 800 m². (Albaladejo y Stocking, 1989)
- (b) Murcia, SE Península Ibérica. Clima semiárido, precipitación anual 300 mm y ETPanual > 1400 mm. Tres años de seguimiento, microcuenca 3000 m². (Romero *et al.*, 1988)
- (c) Elche (Alicante), SE Península Ibérica. Clima semiárido, precipitación anual 350 mm y ETPanual > 1400 mm. Dos tratamientos forestales (surco y terraza) y vegetación espontánea (control). 7 años de seguimiento, parcelas USLE. (Sánchez, 1997)

Tratamiento	Benidorm (d)			Huesca (e)						Zaragoza (f)						Zaragoza (g)							
	A	B	C	Superficie protegida						Longitud 2 m			Longitud 4 m			Longitud 8 m			Cubierta vegetal				
Años				100%	80%	60%	50%	15%	0%	A	B	C	A	B	C	A	B	C	0%	37%	49%	55%	64%
1	69	67	63	29	28	30	33	27	29	34	24	23	34	35	31	34	53	26	26	17	32	36	30
1+2	80	77	82	51	45	51	51	52	50	63	46	44	63	55	58	57	71	51	41	31	59	51	48
1+2+3	90	86	83	65	56	65	65	64	71	77	61	65	78	71	75	72	81	75	53	39	74	65	64
Total g m ⁻²	207	18	13	15	48	242	257	979	1817	15	28	165	38	16	47	10	7	43	70	22	26	21	15

- (d) Benidorm (Alicante), SE Península Ibérica. Clima semiárido, precipitación anual 300 mm y ETPanual > 1400 mm. Suelo quemado (control) y dos tratamientos de regeneración (surco y siembra). 12 meses, tres parcelas de dimensiones 8x2m. (Bautista, 1999)
- (e) Huesca, Depresión del Ebro. Clima semiárido-subhúmedo, precipitación anual 450 mm y ETPanual 1400 mm. 18 meses de estudio, 6 parcelas de dimensiones 4 x 2m, con diferentes grados de superficie protegida. (González Hidalgo, 1996)
- (f) María de Huerva (Zaragoza), Depresión del Ebro. Clima semiárido, precipitación anual <350 mm y ETP anual > 1400 mm. 9 parcelas de diferentes longitudes (dimensiones 2, 4, 8 m x 1 m) y tres valores de pendiente (A, B, C). 2 años de seguimiento. (Echeverría y González Hidalgo, datos no publicados)
- (g) María de Huerva (Zaragoza), Depresión del Ebro. Clima semiárido, precipitación anual <350 mm y ETP anual > 1400 mm. 5 parcelas con diferente grado de cubierta vegetal. 2 años de seguimiento. (Echeverría y González Hidalgo, datos no publicados)

Tratamiento	Cáceres (h)		Pirineos (i)		Africa del Sur (j)						Marruecos (k)					Méjico (l) (*)				
	Dehesa										P1	P2	P3	P4	P5	P1.	P2	P3	P4	
Años			1996	1997	1979	1980	1981	1982	1983	1984	1985									
1	39		75	34	34	39	18	21	31	21	28	53	36	60	77	81	24	62	33	36
1+2	69		92	52	52	53	31	33	53	39	54	71	64	73	86	90	48	73	61	63
1+2+3	80		93	65	63	66	41	45	70	51	65	76	77	80	89	93	67	81	79	83
Total g m ⁻²	23		153	233	7	26	58	28	11	12	26	218	347	638	226	615	53	16	12	9

- (h) Cáceres, Interior SWPenínsula Ibérica. Clima semiárido-subhúmedo, precipitación anual 500 mm. Dehesa, datos promedio diario por evento obtenidos en 27 parcelas abiertas. 2 años. (Gómez y Schnabel, 1992).
- (i) Pirineo oscense (Cuenca de Arnas). N Península Ibérica. Clima submediterráneo, precipitación anual 930 mm. Campos abandonados colonizados por matorral. A partir de estimaciones de carga en suspensión por crecidas. (Lorente *et al.*, 2000)
- (j) Africa del Sur. Clima semiárido, precipitación anual en torno a 480 mm. Datos promedio por día de lluvia de ocho parcelas abiertas. Siete años de seguimiento. (Le Roux y Ross, 1986).
- (k) Marruecos. Clima semiárido, precipitación anual 300 mm. Cinco parcelas de 4 m², dos inviernos (1978 y 1979). (Imeson, 1983)
- (l) Méjico. Clima tropical con estación seca, precipitación anual 700 mm, concentrada en verano. Cuatro colectores abiertos. Máximos diarios sobre el período (Mayo 1986-Sep. 1988). (Palacio y Vázquez, 1990). (*) Datos totales en Mg, su presentación original impide la conversión a g m⁻².

Tabla 2. Porcentaje de erosión acumulada interanual en periodo superior a dos años en los tres máximos eventos.

Table 2. Accumulated interannual soil erosion (three events).

	Elche (a) (*)			Murcia (b)	Portugal (c)	Méjico (d)	A. Sur (e)	Italia (f)
	Control	Surco	Terraza					
1	48	52	54	30	43	31	34	37
1+2	66	61	66	50	63	53	51	-
1+2+3	73	71	77	70	76	70	66	60
Total g m ⁻²	3306	6418	5639	875	13	52 (+)	167	81 (\$)

- (a) En Sánchez (1997), véase Tabla 1. (*) No se contabiliza el evento extremo de 1987, que por si solo supone más del 70% de todo el período.
- (b) A partir de datos de Romero *et al.* (1988), véase Tabla 1.
- (c) En Jahn *et al.* (1989). Valores calculados a partir de los datos de los tres máximos diarios de la carga en suspensión de una cuenca de 600 ha obtenidos durante 4 años, con 600 mm de precipitación y 1600 mm ETP.
- (d) A partir de los datos ofrecidos en Palacio y Vázquez (1990), (+) datos expresados en Mg por proceder de parcelas abiertas, véase Tabla 1.
- (e) Como promedio del sedimento producido diariamente en 8 colectores de flujo durante 7 años, a partir de los datos de Le Roux y Ross (1986).
- (f) Promedio de valores originales de 18 parcelas. (\$) estimado a partir de promedios mensuales de erosión de cada parcela, según Ollesch y Vacca (2002).

Tabla 3. Porcentaje de erosión acumulada interanual promedio en los tres máximos eventos. Valores originales United States Department of Agriculture (USDA), USLE data base, estimados a partir de los promedios anuales.

Table 3. Accumulated interannual soil erosion (three events). Original data USDA, USLE data base.

	Holly Springs, Mississippi								Watkinsville, Georgia						Clarinda, Iowa			
	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P1	P2	P3	P4
1	28	30	32	35	28	33	23	13	50	43	47	41	45	51	39	57	44	39
1+2	41	43	47	51	42	47	35	24	91	65	69	63	70	73	60	70	64	60
1+2+3	50	53	57	62	52	57	45	32	71	79	81	76	85	83	71	80	76	76
Total g m ⁻²	3.4	0.9	1.8	2.0	16.7	5.9	16.9	6.2	0.4	0.7	0.5	0.7	0.3	0.8	10.9	9.8	9.5	6.7

Holly Springs, Mississippi, 1959-1968

Watkinsville, Georgia, 1940-1960

Clarinda, Iowa, 1932-1962

no participa del fenómeno erosivo (Coppus y Imeson, 2002).

Un segundo enfoque consiste en analizar los datos desde la perspectiva del período completo de las investigaciones, que solamente los casos que superan los dos años permiten realizar. Incluimos otros trabajos de ambientes semejantes en los que se ofrecen datos diarios pero sin poder precisar su escala anual. En la Tabla 2 se aprecia la concentración del fenómeno erosivo *entre años*, lo cual incide de nuevo en la importancia que *un solo evento* o *unos pocos*, tienen en la dinámica geomorfológica y erosiva de estos ambientes. Es notable el hecho de que el suceso máximo produce valores que superan el 25% del total del periodo, y los tres sucesos extremos del mismo periodo superan más del 50% del total.

Los estudios publicados o accesibles de más larga duración de los que tenemos conocimiento se deben a Edwards y Owen (1991) y a las bases de datos del USDA referidas a la USLE (<http://topsoil.nserl.purdue.edu/nserlweb/usle/>). Los primeros presentaron resultados de 28 años y 9 microcuencas en EEUU con diferentes condiciones de prácticas agrícolas y suelos, dentro de un programa de control de más de 229 cuencas desde los años cuarenta del siglo XX. En su caso, el porcentaje acumulado de los tres máximos eventos supone valores en torno al 50% del total del período, e incluso el máximo absoluto supone en numerosas cuencas valores de sedimento del orden del 25% sobre el total del período (véase también Ollesch y Vacca 2002, Tabla 2, p. 27), magnitudes que Gallart *et al.* (2002) expresan en la ratio 90/10,

referida a cómo la exportación del sedimento (en cuencas prepirenaicas) se realiza en un noventa por ciento en tan solo el diez por ciento de los eventos. Respecto a las bases de datos de la USLE, la información incluye más de 20.000 días de erosión, procedentes de cuatro estaciones experimentales con distintas parcelas, tratamientos y condiciones. Los periodos oscilan entre la década y dos décadas. En la Tabla 3 mostramos los valores promedio de cada estación; los datos se presentan en sus promedios generales para cada parcela, y aunque los ambientes climáticos en este caso difieren de los anteriormente señalados, el fenómeno de concentración temporal se vuelve a repetir.

Dada la evidente relación precipitación-erosión, de todo lo anterior se concluye que los eventos extremos de precipitación son factores determinantes del fenómeno erosivo (pero véase más adelante), y devuelve nuevamente el problema a la interacción magnitud-frecuencia, al análisis de los períodos de retorno de estos sucesos y a la necesidad que existe en el mundo científico de discutir en su adecuado marco temporal los datos obtenidos en parcelas experimentales durante períodos de tiempo restringidos, que se ofrecen en ocasiones como tasas de erosión.

6. Escalas temporales y eventos extremos

Un problema que no ha sido resuelto de modo satisfactorio hasta el presente en geomorfología es la integración de fenómenos que ocurren en diferentes escalas de tiempo y espacio. Y de ello es buena prueba la dificultad de extrapolar los resultados experimentales obtenidos en parcelas de campo, bien por seguimiento o por simulación de procesos, a espacios de mayor extensión y a lapsos de tiempo más prolongados. Esta dificultad no es trivial, y su solución es la que otorga validez a los estudios de detalle, a la vez que a estos les permite ofrecer claves para comprender los fenómenos de otras escalas de tiempo y espacio.

Las investigaciones de los efectos potenciales del cambio del clima en geomorfología tropiezan con este hecho. Sin duda la geomorfología regional responde a una señal climática de largo plazo (aunque no sólo a ella) cuyos efectos además están suavizados por un retardo (Thornes y Brunnsden, 1977). Bajo tal asunción, a esta escala la variabili-

dad interanual del clima tiene escasa importancia. Sin embargo la relación “forma de relieve - sistema atmosférico” se manifiesta con toda claridad en la geomorfología de detalle. A esta escala, la variabilidad climática representa el factor principal que controla la erosión del suelo (Mulligan, 1998). En resumen, debido a que las condiciones del clima son sumamente variables en el espacio y tiempo, los efectos geomorfológicos de la variabilidad del clima pueden ser tan importantes o más que el propio Cambio del Clima, y esto es especialmente evidente en las escalas temporales (y espaciales) de detalle. Esta situación se acentúa donde las condiciones climáticas “normales” se caracterizan por una variabilidad interanual elevada, como las áreas mediterráneas, y cobra especial relevancia ante la incógnita de si esta variabilidad está aumentando (Chagnon *et al.*, 1997 y 2000).

En consecuencia, la discusión sobre si se está produciendo un cambio en los sucesos extremos, y cuáles podrían ser sus eventuales efectos geomorfológicos, debe relacionarse en primer lugar con la variabilidad interanual del clima y sus proyección espacial, pues aquella varía de lugar a lugar. En segundo lugar, la comprensión del cómo se articulan ambos hechos, sucesos extremos y variabilidad climática, con el cambio climático se configura como una dovela fundamental de la geomorfología de nuestros días (Viles y Goudie, 2003).

El estudio de la variabilidad climática en la que se integran los sucesos extremos permite indagar sus efectos geomorfológicos a partir de la nueva interpretación de la combinación magnitud-frecuencia basada en las secuencias de aparición y posición de los eventos en un contexto temporal (Viles y Goudie, 2003). La idea central es que los modos de variabilidad interanual del clima (las teleconexiones, por ejemplo) y sus impactos geomorfológicos son la clave para comprender muchos de los cambios actuales, aunque el clima no es el único control y tales planteamientos no significan volver a una nueva geomorfología climatogenética. Dos tormentas consecutivas, por ejemplo, pueden tener menores efectos que si se producen de manera aislada, pues en el primer caso el trabajo realizado por la primera moviliza fácilmente el suelo previamente meteorizado, y en la segunda tormenta, dado el escaso tiempo transcurrido desde la primera, el control por meteorización sería eficaz. Si por el contrario ambas tor-

mentas se producen con una cierta separación, sus efectos pueden multiplicarse al poder actuar la meteorización. De esta manera el comportamiento de eventos de la misma magnitud resulta variable y complejo, y en las experiencias de campo el resultado de la relación magnitud frecuencia se complica con el propio agotamiento de las parcelas en el tiempo, al pasarse de un control de la erosión por el transporte al control por meteorización (Ollesch y Vacca, 2002).

En los resultados originales mostrados anteriormente (Tabla 1, Tabla 3) se observa este fenómeno (aunque no se hayan incluido los valores de precipitación diaria), y los máximos de precipitación no coinciden exactamente con los máximos valores de erosión resultante (aunque la relación global es evidente).

Este nuevo planteamiento ha sido presentado por Starkel (2002) jerarquizando los sucesos del clima en diferentes escalas temporales, y abre el camino para interpretar el marco holoceno. En su esquema, la variabilidad del clima es una de las causas que produce el agrupamiento de sucesos en cada escala. Esta variabilidad a su vez está sometida a unos modos de variación (las teleconexiones en la escala secular serían un ejemplo), y su comprensión facilita el análisis de los efectos de diferentes sucesos en momentos distintos, aunque el riesgo de circularidad en el análisis del pasado (no solo el holoceno) es evidente, pues la reconstrucción geomorfológica es una pieza fundamental de la reconstrucción climática (Viles y Goudie, 2003).

7. Recapitulación

Los valores promedio de diferentes elementos del clima se han empleado habitualmente como indicadores de la agresividad pluvial (cf. Fournier, Wischmeier, Oliver), del régimen morfoclimático (cf. Peltier, Wilson), de la capacidad biológica (cf. Thornthwaite, Köppen, Papadakis), etc. Sin embargo, su uso no parece adecuado para analizar aquellos procesos compuestos de sucesos discontinuos con diferentes frecuencias, agrupamientos y magnitudes, como los eventos de lluvia y los procesos asociados de la erosión del suelo, la inestabilidad de laderas, las avenidas y las inundaciones (Ahnert, 1987; De Ploey *et al.*, 1991).

La magnitud y frecuencia son dos características que definen los procesos de los sistemas naturales (Thornes y Brunnsden, 1977; Thorn, 1988) y su importancia se reconoce desde el trabajo de Wolman y Miller (1960). Los dos conceptos han sido empleados especialmente en hidrología, climatología, geomorfología fluvial y análisis de la erosión (Scoging, 1982; Martín Vide, 1984; Romero *et al.*, 1988; De Ploey *et al.*, 1991) y recientemente han sido revisados por Viles y Goudie (2003). Para estos autores, el efecto de los sucesos climáticos no depende tanto de su magnitud y frecuencia sino de su agregación (no acumulación) en el tiempo, que está controlada por la variabilidad del clima. En consecuencia el estudio de la variabilidad del clima y sus modos de variación resulta ser una clave fundamental para comprender el comportamiento de los sistemas geomorfológicos del presente y su hilazón con tiempos pasados. Ello no supone volver a una geomorfología climatogenética sino desvelar la imbricación del cambio del clima, por efecto de su variabilidad, en la geomorfología.

La consideración del efecto tiempo en la relación magnitud y frecuencia de los sucesos conduce a nuevas perspectivas dentro de la geomorfología, como la noción de respuesta compleja de los paisajes (Brunnsden, 2001) que supone aceptar un comportamiento no lineal de los sistemas geomorfológicos ante la variabilidad del clima. Si esta variabilidad y la agregación de sucesos climáticos en el tiempo y en el espacio pueden ser piezas importantes en el futuro de la geomorfología, el conocimiento de dicha variabilidad en diferentes escalas temporales significa un paso adelante para comprender las posibilidades y limitaciones de la extrapolación de observaciones de corto plazo.

Por ello en los sistemas mediterráneos, sometidos a una variabilidad del clima intrínsecamente alta, y bajo la perspectiva del Cambio del Clima, el uso de los valores promedio de la precipitación para evaluar cualquier proceso de los sistemas naturales acusa los problemas que derivan de la variabilidad temporal de la lluvia; y el valor esperado de la lluvia en determinado intervalo de tiempo y las frecuencias asociadas a cada valor devuelven el problema al análisis clásico de los períodos de retorno: ¿cómo aceptar en un marco evolutivo ciertamente cambiante los valores estimados de retorno que resultan de extrapolaciones de modelos empíricos hacia lapsos de tiempo de centenares o

miles de años?, ¿no sería más cauteloso aceptar extrapolaciones de las condiciones actuales hasta umbrales más modestos (digamos.., ¿50 años?), pero nunca para períodos más prolongados?, ¿acaso dicha extrapolación no lleva pareja una asunción implícita del uniformitarismo, negado por las evidencias de campo?, ¿no es menos cierto que los ajustes realmente siempre adolecen de normalidad de los residuos?

En consecuencia, la irregularidad de la lluvia unida a sus variaciones en el tiempo (tendencias) plantea problemas en el análisis de los sistemas naturales por los métodos clásicos de valores promedio, cuya utilidad se reduce considerablemente (1) donde se haya detectado una fuerte componente estacional de aquéllas, (2) en donde los eventos extremos representen un valor elevado en el total anual, (3) en donde se hayan detectado tendencias en los volúmenes de lluvia o en su variabilidad temporal, y, finalmente, (4) en donde se conjuguen entre sí las situaciones precedentes. El empleo de los datos diarios pudiera ser una eficaz herramienta para analizar los sistemas naturales y los procesos asociados (geomorfológicos, hidrológicos, biológicos, etc) pues permite considerar los conceptos de magnitud y frecuencia de los aportes en la escala de tiempo en que éstos se producen, y precisar las características del régimen pluvial que los valores promedio no recogen.

Estas son algunas de las razones por las que las ideas de Schumm y Lichty (1965) parecen volver a planear bastantes años después de la publicación de su trabajo (véase Kennedy, 1997). Lo que en un momento puede ser definitivo en la evolución, visto con una perspectiva temporal más amplia puede ser absolutamente irrelevante y viceversa. De ello saben mucho quienes tras años de control y seguimiento de parcelas de campo solamente encuentran tasas de erosión despreciables, cuando uno lo que ve es un paisaje erosionado; o a la inversa, cuando un doctorando se encuentra con un suceso que se “escapa” literalmente del resto de sus datos referidos a un pequeño lapso de tiempo, el de su beca de estudio. El compromiso final, siempre cauteloso, pareciera ser la articulación de un marco temporal en el que los sucesos extremos, cual sea su definición, producirían la superación de umbrales ante lo que el sistema correspondiente se abriría a un comportamiento con posibles múltiples respuestas.

8. Conclusiones

La revisión de la bibliografía sobre erosión diaria del suelo en ambientes mediterráneos permite sugerir que el fenómeno está sumamente concentrado en el tiempo.

Los datos diarios consultados indican que, pese a la elevada variabilidad espacial y temporal del proceso, y a pesar de las diferentes aproximaciones metodológicas, más de la mitad del suelo erosionado anualmente se produce en tan solo tres eventos erosivos. Esta concentración se mantiene además en escalas temporales superiores. Así, la relación se mantiene con independencia de la duración de los estudios (ej., los tres eventos erosivos máximos también concentran más de la mitad de erosión de 2, 3, 10 o más años).

En ambientes mediterráneos de gran variabilidad y concentración pluvial la interpretación del proceso erosivo debe integrar estas características, por lo que se necesitan seguimientos prolongados en el tiempo.

Este hecho resulta especialmente relevante y debe ser cuidadosamente considerado a la hora de extrapolar los datos de parcelas experimentales.

Agradecimientos

Los autores agradecen el soporte financiero concedido en los Proyectos: “Variabilidad climática y dinámica forestal en ecosistemas de ecotono” (Ministerio de Ciencia y Tecnología REN2003-07453), “Evolución de las tendencias de la precipitación en el Valle del Ebro y su distribución espacial” (Ministerio de Ciencia y Tecnología REN2002-01023-CLI), y el Programa de grupos de investigación consolidados’ (grupo Clima, Cambio Global y Sistemas Naturales, BOA 147, de 18-12-2002), financiado por el Gobierno de Aragón.

Referencias bibliográficas

- Abbs, D.J. (1999): A numerical modeling study to investigate the assumptions used in the calculation of probable maximum precipitation. *Water Resources Research*, 35, 785-796.
- Albaladejo, J. & Stocking, M. (1989): Comparative evaluation of two models in predicting storm soil loss from erosion plots in semi-arid Spain. *Catena*, 16, 227-236.

- Ahnert, F. (1987): An approach to the identification of morpho-climates. En: *International Geomorphology* (V. Gardiner, ed.). John Wiley & Son, Chichester, 159-188.
- Armengot-Serrano, R. (1994): Las precipitaciones extraordinarias. En: *Atlas climàtic de la Comunitat Valenciana* (A. Pérez Cueva, ed.). Conselleria d'Obres Públiques, Urbanisme i Transports. Generalitat Valenciana, Col.leció Territori, N.º 4. Valencia, 98-99.
- Bautista, S. (1999): *Regeneración post-incendio de un pinar (Pinus halepensis, Miller) en ambientes semiáridos. Erosión del suelo y medidas de conservación a corto plazo*. Tesis de Doctorado, Universidad de Alicante, 238 pp.
- Beguiría, S. & Lorente, A. (1999): Distribución espacial del riesgo de precipitaciones extremas en el Pirineo Aragonés Occidental. *Geographicalia*, 37, 17-36.
- Bhaskaran, B. & Mitchell, J.F. (1998): Simulated changes in southeast Asia monsoon precipitation resulting from anthropogenic emission. *International Journal of Climatology*, 18, 1455-1462.
- Bergkamp, G., Cammeraat, L.H. & Martínez-Fernández, J. (1999): Water movement and vegetation patterns on shrubland and an abandoned field in two desertification-threatened areas in Spain. *Earth Surface Processes and Landforms*, 21, 1073-1090.
- Bradley, A.A. (1998): Regional frequency analysis methods for evaluating changes in hydrologic extremes. *Water Resources Research*, 34, 741-750.
- Brunsdon, D. (2001): A critical assessment of the sensitivity concept in geomorphology. *Catena*, 42, 99-123.
- Brunetti, M., Buffoni, L., Maugeri, M. & Nanni, T. (2000): Precipitation intensity trends in Northern Italy. *International Journal of Climatology*, 20, 1017-1031.
- Camarasa, A. (1993): La estructura interna de las tormentas Mediterráneas. *Cuadernos de Geografía*, 54, 169-188.
- Chagnon, S., Chagnon, D., Fosse, E.R., Hoganson, D., Roth Sr., R. & Totsch, J. (1997): Effects of recent weather extremes on the insurance industry: major implications for the atmospheric sciences. *Bulletin American Meteorological Society*, 78 (3), 425-435.
- Chagnon, S., Pielke, R., Chagnon, D., Sylves, R. & Pulwarty R. (2000): Human factors explain the increased losses from weather and climate extremes. *Bulletin American Meteorological Society*, 81 (3), 437-442.
- Coppus, R. & Imeson, A. (2002): Extreme events controlling erosion and sediment transport in a semi-arid sub-Andean valley. *Earth Surface Processes and Landforms* 27 (13), 1365-1375.
- Croke, J., Hairsine, P. & Fogarty, P. (1999): Runoff generation and re-distribution in logged eucalyptus forest, south-eastern Australia. *Journal of Hydrology*, 216, 56-77.
- Crosta, G. (1998): Regionalization of rainfall thresholds: an aid to landslide hazard evaluation. *Environmental Geology*, 35 (2-3), 131-145.
- De Luís, M., González-Hidalgo, J.C. & Sánchez, J.R. (1996): Análisis de la distribución espacial de la concentración diaria de precipitaciones en el territorio de la Comunidad Valenciana. *Cuadernos de Geografía*, 59, 221-240.
- De Luís, M. (2000): *Estudio espacial y temporal de las tendencias de lluvia en la Comunidad Valenciana (1961-1990)*. Geoforma, Logroño, 112 pp.
- De Luís, M., García-Cano, M.F., Cortina, J., González-Hidalgo, J.C., Sánchez, J.R. & Raventós, J. (2001): Climatic trends, disturbances and succession in a Mediterranean shrubland. *Forest Ecology and Management*, 147 (1), 25-37.
- De Luís, M., González-Hidalgo, J.C., & Raventós, J. (2003): Effects of fire and torrential rainfall on erosion in a Mediterranean gorse community. *Land Degradation & Development*, 14 (2), 203-213.
- Delitala, A., Cesari, D., Chesa, P. & Ward, M. (2000): Precipitation over Sardinia (Italy) during the 1946-1993 rainy seasons and associated large-scale climatic variations. *International Journal of Climatology*, 20, 519-541.
- De Ploey, J., Kirkby, M.J. & Ahnert, F. (1991): Hillslope erosion by rainstorms: a magnitude-frequency analysis. *Earth Surface Processes and Landforms*, 16, 399-409.
- Diodato, N. (2004): Local models for rainstorm-induced hazard analysis on Mediterranean river torrential geomorphological systems. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 4, 389-397.
- Easterling, D.R., Evans, J.L., Grosiman, P.Ya., Karl, T.R., Kunkel, K.E. & Ambenje, P. (2000): Observed variability and trends in extreme climate events: a brief review. *Bulletin American Meteorological Society*, 81 (3), 417-425.
- Edwards, W.W. & Owen, L. (1991): Large storm effects on total soil erosion. *Soil and Water Conservation*, 46 (1), 75-78.
- Egozcue, J.J. & Ramis, C. (2001): Bayesian hazard analysis of heavy precipitation in eastern Spain. *International Journal of Climatology*, 21, 1263-1279.
- Erena, M. & Rincón, L. (1998): Spatial and temporal distribution of the rainfall in the Murcia region. En: Conference on Global Change *The Earth's changing land*. GCTE-LUCC, Open Science. Barcelona, (España), 14-18 Marzo (texto sin paginar)
- Esteban-Parra, M.J., Rodrigo, F.S. & Castro-Diez, Y. (1998): Spatial and temporal patterns of precipitation in Spain for the period 1880-1992. *International Journal of Climatology*, 18, 1557-1574.
- Folland, C.K., Miller, C., Bader, D., Crowe, M., Jones, P., Plummer, N., Parker, D.E., Rogers, J. & Scholefield, P. (1999): Workshop on Indices and Indicators for climate extremes. *Climate Change*, 42, 31-43.
- Gallart, F. (1995): The relative geomorphic work affected by four processes in rainstorms: A conceptual approach to magnitude and frequency. *Catena*, 25, 353-364.
- Gallart, F., Regües, D., Latron, J. & Llorens, P. (2002): Estacionalidad de los procesos hidrológicos y el transporte de

- sedimento en las cuencas de Vallcebre (Prepirineo Catalán). En *Estudios recientes (2000-2002) en Geomorfología. Patrimonio, montaña y dinámica territorial* (E. Serrano, et al., eds), 489-499, SEG-Dep. Geografía, Universidad de Valladolid.
- García, N.O. & Vargas, W.M. (1997): The temporal climatic variability in the Rio de la Plata Basin displayed by the river discharges. *Climatic Change*, 38, 359-379.
- García Ruiz, J.M., Arnáez, J., White, S.M., Lorente, A. & Beguería, S. (2000): Uncertainty assessment in the prediction of extreme rainfall events: an example from the central Spanish Pyrenees. *Hydrological Processes*, 14, 887-889.
- García Ruiz, J.M., Martí-Bono, C., Lorente, A. & Beguería, S. (2002): Geomorphological consequences of frequent and infrequent rainfall and hydrological events in Pyrenees mountains of Spain. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 7: 303-320.
- Genta, J.L., Pérez-Iribarren, G. & Merchoso, C.R. (1998): A recent increasing trend in the streamflow of rivers in southeastern South America. *Journal of Climate*, 11, 2858-2862.
- Georgievsky, V.Yu., Ezhou, A.V., Shalygin, A.L., Shiklomanov, I.A. & Shiklomanov, A.I. (1996): Evaluation of possible climate change impact on hydrological regime and water resources of the former USSR rivers. *Russian Meteorology and Hydrology* 11, 89-99.
- Gil Olcina, A. (ed.) (1986): *Inundaciones en la ciudad y término de Alicante*. Servicio Publicaciones Universidad Alicante, Alicante (España), 179 pp.
- Gómez, D. & Schnabel, S. (1992): Procesos sedimentológicos e hidrológicos en una pequeña cuenca bajo explotación de dehesa en Extremadura. En *Estudios de Geomorfología en España* (F. López Bermúdez et al., eds.), Sociedad Española de Geomorfología, Murcia, 55-63.
- González-Hidalgo, J.C., (1996): Efectos de la superficie protegida en la variación espacial de la producción de sedimentos. *Rev. C&G*, 8 (3-4), 65-76.
- González-Hidalgo, J.C., De Luis, M. & Raventós, J. (2001): The spatial and temporal structure of rainfall trends in the Valencia Region (eastern of Spain) over the second half of the 20th century. En *Detecting and modeling Regional climate change and Associated impacts* (M. Bruned y A.D. López, eds.), Springer Verlag, Berlin, 175-189.
- González-Hidalgo, J.C., De Luis, M., Raventós, J. & Sánchez, J.R. (2003): Daily rainfall trend in the Valencia Region of Spain. *Theoretical and Applied Climatology*, 75 (1-2), 117-130.
- González-Hidalgo, J.C., De Luis, M., Raventós, J., Cortina, J. & Sánchez, J.R. (2004 a): Hydrological response of mediterranean gorse shrubland under extreme rainfall simulation event. *Zeitschrift für Geomorphologie*, 48 (3), 293-304.
- González-Hidalgo, J.C., De Luis, M. & Vicente, S. (2004 b): Análisis comparativo del comportamiento de los máximos diarios mensuales de precipitación en el sector central de la depresión del Ebro y en el Pirineo (1931-2000). En *Geografía Física de Aragón. Aspectos generales y temáticos* (J.L. Peña et al., eds.), Universidad de Zaragoza e IFC, Zaragoza, 231-242.
- Groisman, P.Ya., Karl, T.R., Easterling, D.R., Knight, R.W., Jamason, P.B., Hennessy, J.K., Suppiah, R., Page, Ch.M., Wibig, J., Fortuniak, K., Razuvaev, V.N., Douglas, A., Forland, E. & Zhai, P.M. (1999): Changes in the probability of heavy precipitation: important indicators of climatic changes. *Climatic Change*, 42 (1), 243-283.
- Hennessy, K.J., Gregory, J.M. & Mitchell, J.F.B. (1997): Changes in daily precipitation under enhanced greenhouse conditions: Comparison of UKHI and CSIRO9 GCM. *Climate Dynamics*, 13, 667-380.
- Hershfield, D.M. (1977): On the probability of extreme rainfall events. *Bulletin American Meteorological Society*, 54, 1013-1018.
- Houghton, J.T., Ding, Y., Griggs, D.J., Noguier, M., van der Linden, P.J. & Xiaosu, D. (eds.) (2001): *Climate change 2001. The scientific basis*. Cambridge University Press, UK, 896 pp.
- Imeson, A. (1983): Studies of erosion thresholds in semi-arid areas, field measurements of soil loss and infiltration in northern Morocco. *Catena Supplement*, 4, 79-89.
- Iwashima, T. & Yamamoto, R. (1993): Astatistical analysis of the extreme events: long term trend of heavy daily precipitation. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 71, 637-640.
- Jahn, R., Pfannschmidt, D. & Stahr, K. (1989): Soils from limestone and dolomite in the central Algarve (Portugal), their qualities in respect to groundwater recharge, runoff erodibility and present erosion. *Catena Supplement*, 14, 25-42.
- Karl, T.R. & Knight, R.W. (1998): Secular trends of precipitation amount, frequency and intensity in the USA. *Bulletin American Meteorological Society*, 79, 2312-241.
- Karl, T.R., Knight, R.W. & Plummer, N. (1995): Trends in high-frequency climate variability in the twentieth century. *Nature*, 377, 217-220.
- Kennedy, B. (1997): Classics in physical geography revised: Schumm S.A. and Lichty, R.W., 1965: Time, space and causality in Geomorphology. *American Journal of Science*, 263, 110-119. *Progress in Physical Geography*, 21 (3), 419-423.
- Kieffer, A. & Bois, P. (1997): Variability of the statistical characteristics of extreme rainfall values in the French Alps. *Rev. Science Eau*, 10, 199-216.
- Kunkel, K.E. (2003): North America trends in extreme precipitation. *Natural Hazards*, 29, 291-305.
- Lana, X., Fernández-Mills, G. & Burgueño, A. (1995): Daily precipitation maxima in Catalonia (north-east Spain): Expected values and their spatial distribution. *International Journal of Climatology*, 15, 341-354.
- La Roca, N. (1991): Precipitaciones mediterráneas y movimientos de masa en margas de los valles de Alcoi. *Cuadernos de Geografía*, 50, 171-196.

- Lavorel, S., Canadell, J., Rambal, S. & Terradas, J. (1998): Mediterranean terrestrial ecosystems: research priorities on global change effects. *Global Ecology & Biogeography Letters*, 7, 157-166.
- Le Roux, J. & Roos, Z. (1986): Wash erosion on a debris covered slope in a semiarid climate. *Zeitschrift für Geomorphologie*, 30 (4), 477-483.
- Lewis, R.P.W. (1992): Flooding at Carmarthen in October 1987: Historical Precedents and Statistical Methods. *Weather*, 47, 82-89.
- Lins, H.F. & Slack, M.L. (1999): Streamflow trends in the United States. *Geophysical Research Letter*, 26, 227-230.
- Llasat, M.C. & Puigcerver, M. (1994): Meteorological factors associated with floods in the North-Eastern part of the Iberian Peninsula. *Natural Hazards*, 9, 81-93.
- López Bermúdez, F. & Romero, M.A. (1993): Génesis y consecuencia erosivas de las lluvias de alta intensidad en la región mediterránea. *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 18-19, 7-28.
- Lorente, A., Martí Bono, C., Beguería, S., Arnáez, J. & García Ruíz, J.M. (2000): La exportación de sedimento en suspensión en una cuenca de campos abandonados, Pirineo central español. *Rev. C&G*, 14 (1-2), 21-34.
- Maheras, P. (1988): Changes in precipitation conditions in the Western Mediterranean over the last century. *Journal of Climate*, 8, 179-189.
- Maheras, P. & Kolyva-Machera, F. (1990): Temporal and spatial characteristics of annual precipitation over the Balkans in the Twentieth Century. *International Journal of Climatology*, 10, 495-504.
- Mannaerts, C.M. & Gabriels, D. (2000): A probabilistic approach for predicting rainfall soil erosion losses in semiarid areas. *Catena*, 40, 403-420.
- Martín Vide, J. (1984): Análisis de la irregularidad de la precipitación diaria en el litoral mediterráneo de la Península Ibérica. *Revista de Geofísica*, 40, 101-106.
- Martín-Vide, J. (1994): Precipitaciones: máximos diarios probables e irregularidad. En: *Atlas climàtic de la Comunitat Valenciana* (A. Pérez Cueva, ed.). Conselleria d'Obres Públiques, Urbanisme i Transports. Generalitat Valenciana, Col.lecció Territori, N.º 4, Valencia (España), 94-96.
- McGuffie, K., Henderson-Sellers, A., Holbrook, N., Kothavala, Z., Balachova, O. & Hoekstra, J. (1999): Assessing simulations of daily temperature and precipitation variability with global climate models for present and enhanced greenhouse climates. *International Journal of Climatology*, 19, 1-26.
- Meehl, G.A., Zwiers, F., Evans, J., Knutson, T., Mearns, L. & Whetton, P. (2000): Trends in extreme weather and climate events: issues related to modeling extremes in projections of future climate change. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 81 (3), 427-436.
- Milly, P.C., Wetherald, R.T., Dunne, K.A. & Delworth, T.L. (2002): Increasing risk of great floods in a changing climate. *Nature*, 415 (31), 51-517.
- Mulligan, M. (1998): Modeling the geomorphological impact of climatic variability and extreme events in a semi-arid environment. *Geomorphology*, 24, 59-78.
- Nicholls, N. & Murray W. (1999): Workshop on Indices and Indicators for climate extremes. Precipitation. *Climatic Change*, 42, 23-29.
- Nicholson, S.E. (1993): An overview of African fluctuation on the last decade. *Journal of Climate* 6, 1463-1466.
- Nyberg, R. & Rapp, A. (1998): Extreme erosional events and natural hazards in Scandinavian mountains. *Ambio*, 27, 292-299.
- Oliver, J.E. (1980): Monthly precipitation distribution: a comparative index. *Professional Geographer*, 32, 300-309.
- Ollesch, G. & Vacca, A. (2002): Influence of time on measurements results of erosion plot studies. *Soil & Tillage Research*, 67, 23-39.
- Osborn, T.J., Hulme, M., Jones, P.D. & Basnett, T.A. (2000): Observed trends in the daily intensity of United Kingdom precipitation. *International Journal of Climatology*, 20, 347-364.
- Pagliara, S., Viti, C., Gozzini, B., Meneguzzo, F. & Crisci, A. (1998): Uncertainties and trends in extreme rainfall series in Tuscany, Italy: Effects on urban drainage networks design. *Water Science and Technology*, 37, 195-202.
- Palacio, J.L. & Vázquez, L. (1990): Relative importance of modelling processes in badland slopes. An example in central Mexico. *Zeitschrift für Geomorphologie*, NF, 34 (3), 301-306.
- Palmer, T.N. & Ralsanen, J. (2002): Quantifying the risk of extreme seasonal precipitation events in a changing climate. *Nature*, 415 (31), 512-514.
- Petterssen, S. (1956): *Weather Analysis and Forecasting*, Vol. I, McGraw-Hill Company, New York (EEUU), 428 pp.
- Plummer, N., Salinger, J.A., Nicholls, N., Suppiah, R., Hennessy, R., Leighton, R.M., Trewin, B., Page, C.M. & Lough, J.M. (1999): Changes in climate extremes over the Australian region and New Zeland during the twentieth century. *Climatic Change*, 42, 1, 183-202.
- Poesen, J. & Hooke, J. (1997): Erosion, flooding and channel management in Mediterranean environments of southern Europe. *Progress in Physical Geography*, 21 (2), 157-199.
- 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.
- Puigdefàbregas, J. & Mendizabal, T. (1998): Perspectives on desertification: Western Mediterranean. *Journal of Arid Environments*, 39, 209-224.
- Quereda, J. (1994): *¿Hacia un cambio climático?* Publicaciones de la Universitat Jaume I, Castelló. Castellón de la Plana (España), 27 pp.
- Romero, M.A., Cabezas, F. & López Bermúdez, F. (1992): Erosion and fluvial sedimentation in the river Segura basin. *Catena*. 19, 379-392.

- Romero, M.A., Lopez Bemúdez, F., Thornes, J., Francis, C. & Fisher, G. (1988): Variability of overland flow erosion in a semiarid Mediterranean environment under matorral cover, Murcia, Spain. *Catena Supplement*, 13, 139-146.
- Romero, R., Guijarro, J.A., Ramis, C. & Alonso, S. (1998): A 30-year (1964-1993) daily rainfall data base for the Spanish Mediterranean regions: First exploratory study. *International Journal of Climatology*, 18, 541-560.
- Romero, R., Ramis, C. & Guijarro, J.A. (1999): Daily rainfall patterns in the Spanish Mediterranean area: an objective classification. *International Journal of Climatology*, 19, 95-112.
- Sánchez, J.R. (1997): Estimación de pérdidas erosivas inducidas por las técnicas de preparación del suelo previa a la reforestación en el sur de la Comunidad Valenciana. Tesis de Doctorado, Dep. Ecología, Universidad de Alicante, 190 p.
- Schumm, S.A. (1980): Some applications of the concept of geomorphic thresholds. En *Thresholds in Geomorphology* (D.A. Coates & J.D. Vitek, eds.). Allen & Unwin, London, 472-485.
- Schumm, S.A. & Lichty, R.W. (1965): Time, space and causality in Geomorphology. *American Journal of Science*, 263, 110-119.
- Scoging, H. (1982): Spatial variations in infiltration, runoff and erosion on hillslopes in semiarid Spain. En *Badland geomorphology and piping* (R. Bryan & A. Yair, eds.). Elsevier, London (Reino Unido), 89-112.
- Sharon, D. (1972): The spottiness of rainfall in a desert area. *Journal of Hydrology*, 17, 161-175.
- Starkel, L. (2002): Change in the frequency of extreme events as the indicator of climatic change in the Holocene (in fluvial systems). *Quaternary International*, 914, 25-32.
- Sumner, G., Ramis, C. & Guijarro, J.A. (1993): The spatial organization of daily rainfall over Mallorca, Spain. *International Journal of Climatology*, 13, 89-109.
- Suppiah, R. & Hennessy, K.J. (1998): Trends in total rainfall, heavy rain events and number of dry days in Australia, 1910-1990. *International Journal of Climatology*, 18, 1141-1164.
- Tarhule, A. & Woo, M. (1998): Changes in rainfall characteristics in northern Nigeria. *International Journal of Climatology*, 18, 1261-1271.
- Thorn, C.E. (1988): *Introduction to theoretical Geomorphology*. Unwin Hyman, Londres, 247 pp.
- Thornes, J.B. & Brunnsden, D. (1977): *Geomorphology and Time*. Methuen, Londres, 208 pp.
- Torri, D., Regües, D., Pellegrini, S. & Bazzoffi, P. (1999): Within storm soil surface dynamics and erosive effects of rainstorms. *Catena*, 38, 131-150.
- Trenberth, K.E. & Owen, T.W. (1999): Workshop on Indices and Indicators for climate extremes. Storm. *Climatic Change*, 42, 9-21.
- USDA (2004): *USLE data base*. <http://topsoil.nserl.purdue.edu/nserlweb/usle/>. (consulta realizada 20-11-2004)
- Usón, A. & Ramos, M.C. (2001): An improved rainfall erosivity index obtained from experimental interrill soil losses in soils with mediterranean climate. *Catena*, 43, 293-305.
- Viles, H.A. & Goudie, A.S. (2003): Interannual, decadal and multidecadal scale climatic variability and geomorphology. *Earth-Science Reviews*, 61, 105-131.
- Waylen, P.R., Quesada, M.E. & Cavedes, C.N. (1996): Temporal and spatial variability of annual precipitation in Costa Rica and the Southern Oscillation. *International Journal of Climatology*, 16, 173-193.
- Wainwright, J. (1996): Infiltration, runoff and erosion characteristics of agricultural land in extreme storm events, SE France. *Catena*, 26, 27-47.
- Wheeler, D. & Martín Vide, J. (1992): Rainfall characteristics of mainland Europe's most southerly stations. *International Journal of Climatology*, 12, 69-76.
- White, S., García-Ruiz, J.M., Martí, C., Valero, B., Errea, M.P. & Gómez-Villar, A. (1997): The 1996 Biescas campsite disaster in the central Spanish Pyrenees, and its temporal and spatial context. *Hydrological Processes*, 11, 1797-1812.
- Wigley, T.M. (1985): Impact of extreme events. *Nature*, 316, 106-107.
- Wolman, M.G. & Miller, P.C. (1960): Magnitude and frequency of forces in geomorphic processes. *Journal of Geology*, 68, 54-74.
- Yair, A. & Lavee, H. (1985): Runoff generation in arid and semi-arid zones. In *Hydrological Forecasting* (M.G. Anderson & T.P. Burt, eds.). JW& S., London (Reino Unido), 183-220.
- Yu, B. & Neil, D.T. (1991): Global warming and regional rainfall in the south-west of western Australia and the difference between average and high intensity rainfall. *International Journal of Climatology*, 13, 77-88.
- Yu, B. & Neil, D.T. (1993): Long-term variations in regional rainfall in the south-west of western Australia and the difference between average and high intensity rainfalls. *International Journal of Climatology*, 13, 77-88.
- Zwiers, F.W. & Kharin, V.V. (1998): Changes in the extremes of the climate simulated by CCC GCM2 under CO₂ doubling. *Journal of Climate*, 11, 2200-2222.

Recibido 21 de diciembre de 2004
Aceptado 24 de febrero de 2005