



Respuesta hidro-sedimentaria en dos cuencas mediterráneas representativas afectadas por el cambio global

Hydro-sedimentary response in two representative Mediterranean catchments affected by global change

Calsamiglia, A.; Fortesa, J.; García-Comendador, J.; Estrany, J.*

Mediterranean Ecogeomorphological and Hydrological Connectivity Research Team (<http://medhycon.uib.cat>), Departament de Geografia, Universitat de les Illes Balears. Carretera de Valldemossa km 7,5. 07122, Palma, España. *Correo electrónico: joan.estrany@uib.cat

Resumen

El abandono de tierras de cultivo marginales durante la segunda mitad del siglo XX ha supuesto un proceso de forestación en la Europa mediterránea. Paralelamente, esta mayor disponibilidad de biomasa ha incrementado la superficie afectada por incendios forestales. Con el objetivo de reconocer el efecto de estos procesos de cambio global en la respuesta hidro-sedimentaria, se analiza dicha respuesta en dos pequeñas cuencas (i.e., <math><5\text{ km}^2</math>) representativas de ambientes mediterráneos en la isla de Mallorca. Ambas cuencas fueron intensamente aterrazadas y dedicadas a las actividades agrícolas hasta los años 60 del siglo XX, momento a partir del cual fueron abandonadas y posteriormente afectadas por procesos de forestación. Una de ellas, además, perturbada de forma recurrente por incendios forestales. El análisis se ha llevado a cabo mediante la monitorización del caudal y del transporte de sedimento en suspensión durante el año hidrológico 2013-2014. Las marcadas diferencias en la precipitación anual entre ambas cuencas (1.453 mm frente a 517 mm de la quemada), debido a su ubicación en distintas áreas de afinidad de precipitación en la isla de Mallorca, determinaron en buena medida la diferente respuesta hidro-sedimentaria, aunque el incendio forestal de Julio 2013 mostró una incidencia significativa dado que con un 61% menos de precipitación se generó una producción de sedimento $\approx 20\text{ t km}^2$. No obstante, se trata de un valor muy bajo en ambientes mediterráneos ya que la masiva presencia de estructuras de conservación del suelo y las litologías carbonatadas limitaron la generación de escorrentía y el transporte de sedimento.

Palabras clave: transporte de sedimento en suspensión, forestación, incendios forestales, estructuras tradicionales de conservación del suelo



Abstract

The abandonment of marginal cropland during the second half of the twentieth century led to a process of afforestation in Mediterranean Europe. Meanwhile, the increased availability of biomass has increased the surface area affected by forest fires. With the aim of determining the effect of these processes related with the global change on to the hydro-sedimentary response, an analysis was conducted in two representative catchments of the Mediterranean environments in the Mallorca Island. In both catchments, hillslopes were terraced and intensely used for agricultural activities until the 1960s decade when was abandoned and then afforested. In addition, one of the catchments has been recurrently perturbed by wildfires. The analysis was carried out by monitoring the flow and suspended-sediment transport during the 2013-14 hydrological year. The contrasting characteristics of precipitation between both catchments (1,316 mm in front of 517 mm in the burned one), due to its location in different affinity areas of precipitation on the island of Mallorca mainly determined the hydro-sedimentary response. The impact of wildfire was demonstrated because both catchments yielded ≈ 20 t km² of sediment despite the burned catchment accumulated 61% fewer of rainfall. However, these sediment yields are considered very low if compared with Mediterranean environments due to the massive presence of soil conservation structures and carbonate lithology limited runoff generation and sediment transport.

Keywords: suspended-sediment transport, afforestation, wildfires, soil and water conservation structures

1. Introducción

En el contexto actual de cambio global, los posibles escenarios generados por los modelos de circulación global (*Global Circulation Models*; GCMs) predicen una mayor variabilidad climática en la región mediterránea (IPCC, 2014) que podría causar severas modificaciones en el ciclo hidrológico (Schneider *et al.*, 2013) y en los procesos de transferencia de sedimento en cuencas de drenaje. Este hecho sería consecuencia de una menor y más irregular precipitación, que podría favorecer procesos de desertificación e incrementar el riesgo de eventos extremos (Norrant y Douguédroit, 2006). Sin embargo, existen otros factores del cambio global con gran incidencia sobre las dinámicas hidro-sedimentarias. Uno de los más significativos es la modificación de las coberturas del suelo. Pese a que la atención a escala global está centrada esencialmente en las tasas de deforestación que se dan en países en vías de desarrollo (Kim *et al.*, 2014; FAO, 2014), a escala europea, esta dinámica experimentó un cambio de tendencia a mediados del siglo XX (MacDonald *et al.*, 2000). En los países mediterráneos, la deforestación y el aterrazamiento de tierras marginales para aprovechamiento con fines

agrícolas y ganaderos fue una constante durante milenios (Hooke, 2006). La construcción de estructuras de conservación del suelo (i.e., terrazas y albarradas, además de sistemas de canales artificiales), alteró significativamente las características morfológicas de las cuencas y el funcionamiento de los sistemas naturales de drenaje. Mediante la rotura del gradiente y de la longitud de pendiente se disminuyó la conectividad hidrológica y de los sedimentos entre ladera y canal, contribuyendo a la retención de los suelos y un mayor control de los recursos hídricos (López-Vicente *et al.*, 2013).

A partir de los años 60 del s. XX, el abandono de estas áreas de cultivo tradicionales, como resultado del éxodo rural y la terciarización de la economía, propició el inicio de importantes procesos de forestación (Grimalt *et al.*, 1992; Tomaz *et al.*, 2013). El avance de la superficie forestal, colonizando las antiguas zonas agrícolas, es un factor determinante en la disminución de la escorrentía superficial y de la exportación de sedimentos en diferentes cuencas en España (Morán-Tejada *et al.*, 2010; Buendía *et al.*, 2015). Sin embargo, a medio plazo (i.e., 12-15 años) el abandono de los cultivos con presencia de estructuras de

conservación del suelo puede favorecer una removilización de sedimentos debido al colapso de los muros que los retienen y causar, nuevamente, un aumento de la escorrentía superficial (Lesschen et al., 2008; Bellin et al., 2009; Tarolli et al., 2014). Este aumento de la superficie forestal y la falta de gestión de los bosques conllevan una mayor disponibilidad de combustible que, junto a los periodos de sequía estival en ambientes mediterráneos, incrementan el riesgo de ocurrencia de Grandes Incendios Forestales (i.e., > 500 ha). La eliminación parcial o total de la cobertura vegetal debido al impacto del fuego reduce la capacidad de intercepción, infiltración, evapotranspiración y retención del suelo (Wester et al., 2014), además de la alteración de sus propiedades fisicoquímicas (Úbeda y Outeiro 2009). Durante la ventana de perturbación (*window of disturbance*; Prosser y Williams, 1998) generada por el incendio, numerosos estudios han documentado incrementos de la escorrentía superficial y un menor tiempo en la respuesta hidrológica en escenarios post-incendio (Inbar et al., 1998; Scott et al. 1998; Cerdà y Doerr 2005), aunque es necesario un mayor conocimiento de dichos procesos a escala cuenca de drenaje (Shakesby, 2011).

El objetivo de este trabajo es analizar la respuesta hidro-sedimentaria durante el año hidrológico 2013-14 en dos pequeñas cuencas de drenaje (i.e., <5 km²) representativas de las dinámicas del cambio global en ambientes mediterráneos, incluyendo procesos de abandono de cultivos aterrazados, de forestación e impactos por incendios forestales en la Serra de Tramuntana de Mallorca.

2. Área de estudio

Sa Font de la Vila es una pequeña cuenca de drenaje de 4,8 km² localizada en la comarca del Pariatge, sudoeste de la Serra de Tramuntana (Fig. 1a). La litología está compuesta principalmente por arcillas y limos del Keuper en los fondos de valle -que presentan pendientes inferiores al 10%, lo que unido a una alta capacidad de los suelos ha determinado su histórica explotación agrícola- mien-

tras que en el resto de la cuenca predominan materiales porosos tales como dolomías del Rethiense y calizas del Lias (Fig. 1c). Cuenta con una heterogénea orografía con altitudes comprendidas entre los 71 y los 490 m y una pendiente media del 38%; pese a ello, en el 50% de la superficie no se supera el 15% de pendiente. La interacción entre aguas superficiales y subterráneas en esta cuenca se caracteriza por la presencia de surgencias kársticas (Fig. 1c), proporcionando una presencia de caudal base que confiere un régimen intermitente a la cabecera de la cuenca. En cambio, aguas abajo, el predominio de pérdidas por transmisión caracteriza a la parte baja con un régimen efímero.

Situada en la parte central de la Serra de Tramuntana, la cuenca del Barranc de Biniraix tiene una extensión de 4,4 km² (Fig. 1a). Su litología está caracterizada por la presencia de limos, arcillas y gravas del Cuaternario en las partes bajas y dolomías masivas y brechas del Jurásico inferior en el resto de la cuenca, intercaladas con materiales del Dogger-Malm y Rethiense en la cabecera (Fig. 1c). Su relieve destaca por la presencia de un cañón kárstico (*barranc*, término en lengua catalana). Las altitudes oscilan entre los 100 y 1.091 m y una pendiente media del 81%. La interacción entre aguas superficiales y subterráneas en esta cuenca viene determinada por la diversidad hidrogeológica, dando lugar a tramos de efluencia e influencia, a la vez que cuenta con importantes surgencias kársticas (Fig. 1c), algunas de ellas alóctonas.

El suelo en ambas áreas de estudio está clasificado como *BK45 -bc*, correspondiéndose con la categoría *Calcic cambisol* (FAO, 2006).

Las dos áreas de estudio presentan marcadas diferencias en sus características climatológicas debido a su ubicación en distintas áreas de afinidad de precipitación diaria en la isla de Mallorca (Sumner et al., 1993), condicionadas básicamente por los efectos del relieve. De esta manera, aplicando el método de Emberger (Guijarro, 1986), el clima de Sa Font de la Vila se clasifica como mediterráneo templado sub-húmedo en la zona de cabecera y

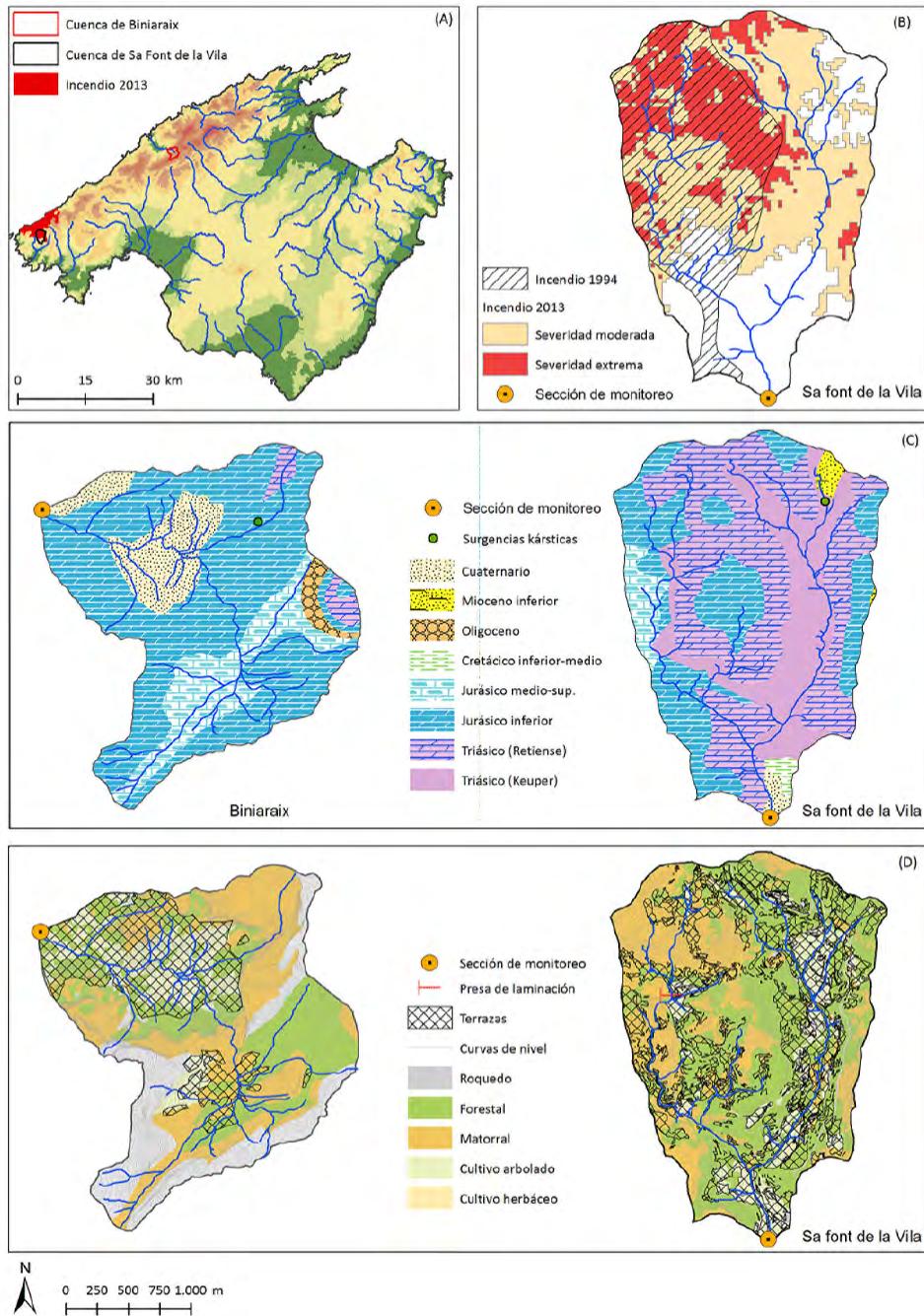


Figura 1: (a) Mapa de localización de las cuencas de Sa Font de la Vila y Biniaraix en la isla de Mallorca, así como el perímetro del incendio ocurrido en la comarca del Pariatge el verano de 2013; (b) área afectada por los incendios de 1994 y 2013; además de la severidad del incendio de 2013 en la cuenca de Sa Font de la Vila; (c) litología y surgencias cársticas en ambas cuencas; (d) usos del suelo, prácticas de conservación del suelo y localización de las secciones de muestreo en ambas cuencas.

Figure 1: (a) Map of the location of the area affected by the July 2013 wildfire in the Pariatge County within the Mallorca Island as well as the location of both Sa Font de la Vila and Biniaraix catchments; (b) 1994 and 2013 wildfire affected areas as well as severity of 2013 wildfire; (c) lithology and location of karstic springs and (f) land uses, soil conservation practices and location of monitoring sections within both catchments.

mediterráneo cálido subhúmedo en la parte baja. Su situación, en el sudoeste de la Serra de Tramuntana, al abrigo de las advecciones húmedas del noreste, causa que las precipitaciones medias anuales sean las más bajas de toda la cordillera mallorquina ($517,8 \text{ mm a}^{-1}$), con un coeficiente de variación interanual del 29% (serie 1974-2010, AEMET). A partir del método Gumbel se establece una precipitación de 85 mm acumulados en 24 horas en un período de retorno de 10 años. La temperatura media anual es de $16,5^{\circ}\text{C}$. El clima de la cuenca de Biniaraix se clasifica como mediterráneo húmedo templado en las zonas de cabecera y mediterráneo subhúmedo templado en las partes bajas (Guijarro, 1986). Se sitúa en el área conformada por el eje central de la Serra de Tramuntana, barrera topográfica que supone un mecanismo de producción de precipitación muy notable en el que se alcanza una precipitación media anual de 1.316 mm (serie 1970-2010, AEMET) con un coeficiente de variación interanual del 27%. Las precipitaciones registran valores superiores a los 100 mm en 24 h para un periodo de retorno de un año y pueden superar los 202 mm acumulados para un periodo de retorno de 10 años. La temperatura media se sitúa en 12°C en cabecera y 17°C en la parte baja (serie 1970-2010, AEMET).

En cuanto a los usos del suelo (Fig. 1d), la cuenca de Sa Font de la Vila está cubierta mayoritariamente por vegetación natural (i.e. 71%) siendo un 52% forestal y un 19% matorral, mientras que en el resto predominan cultivos de secano arbolados (23%) y herbáceos (6%). En Biniaraix, la ocupación por vegetación natural es similar (i.e. 68%) siendo un 36% forestal y un 32% matorral, mientras que el resto de usos se distribuyen en cultivo arbolado (9%) y cultivo herbáceo (2%). A partir de 1960 se produjo un éxodo rural en la isla de Mallorca en el que gran parte de la población activa pasó a dedicarse al sector terciario. Este proceso de abandono de la agricultura generó un proceso de forestación causando un incremento del 79% de la masa forestal en 50 años, según el Inventario Forestal Nacional de Baleares de 1971 (Ministerio de Agricultura, 1971) y de

2010 (Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, 2011).

Las estructuras tradicionales de conservación de agua y suelo en el Barranc de Biniaraix y en Sa Font de la Vila (i.e., terrazas y albarradas) cubren, respectivamente, el 36% y 37% de su superficie (Fig. 1d). Estas estructuras son un indicador de una intensiva, aunque ya pretérita, explotación agrícola en ambas cuencas, actualmente afectadas por procesos de forestación. La cuenca de Sa Font de la Vila ha sufrido dos incendios forestales en los últimos 21 años (Fig.1b). El primero, ocurrido en 1994, afectó al 25% de la superficie, mientras que en el último, en el año 2013, el fuego afectó al 71% de la cuenca. Igualmente, en el incendio más reciente, más del 30% de la superficie perturbada ya se había visto afectada por el incendio de 1994.

3. Materiales y métodos

3.1. Monitorización hidrológica y de transporte de sedimento

En Sa Font de la Vila se monitorizó el año hidrológico 2013-2014. En cambio, en el Barranc de Biniaraix se monitorizaron 9 meses del mismo año hidrológico (i.e., 22 de diciembre del 2013 al 28 de septiembre 2014).

En ambas cuencas se utilizaron diferentes métodos de monitorización hidrológica y del transporte de sedimento. En el caso de Sa Font de la Vila, se procedió a la instalación de una estación de aforo, en la que se monitorizan en registro continuo los flujos de agua y sedimento en suspensión (SS) desde septiembre de 2013, solo un mes después del último incendio. Sin embargo, en el caso de la cuenca del Barranc de Biniaraix, al no disponer de instrumentación para su monitorización continua, se llevó a cabo un muestreo manual, intensivo durante eventos de crecida y semanal durante periodos de caudal base en una sección regular del cauce (Fig. 1d).

La cuenca de sa Font de la Vila cuenta con una sección de aforo (Fig. 1d) instrumen-

tada con un *datalogger Campbell Scientific CR200X* que registra medias quinceminutales de nivel de lámina de agua, turbidez, conductividad eléctrica y temperatura a partir de lecturas minutas recogidas por sonda de presión *Campbell Scientific CS451-L*, turbidímetro *OBS-3+* con doble rango de medida 0-1.000/1.000-4.000 NTU y conductímetro *Hobo U24-001* con rango de 0 a 10.000 $\mu\text{S cm}^{-1}$. Además, para la calibración del turbidímetro y la eliminación de incertidumbres sobre la transformación de valores de nefelometría (NTU) a concentración de sedimento en suspensión (CSS), se instaló un muestreador de sifón de 200 cm del tipo modificado de Schick (1967) equipado con 12 botellas separadas cada 12 cm, con el que se recogieron muestras de SS durante las crecidas. Además, se recogieron muestras integradas de agua y SS (500 ml) de forma manual y en intervalos de 30 minutos durante los eventos de crecida y semanalmente en periodos de caudal base. Estas muestras se recogieron en la parte central de la sección, junto a la sonda de turbidez, y se utilizaron para su calibración dado que las diferencias que puedan existir entre las muestras recogidas manualmente y las obtenidas directamente del muestreador de sifón, estudios previos realizados en grandes ríos han determinado variaciones de entre el 10% y el 20% (i.e., Batalla, 1993). Además, observaciones directas confirman que el flujo de agua tuvo suficiente turbulencia a lo largo de la sección para que las diferencias espaciales que se pudieran producir en cuanto a la CSS fueran poco importantes.

En ambas cuencas el caudal (Q) se obtuvo mediante curva de gastos elaborada con parámetros hidráulicos de la sección monitorizada obtenidos a partir de la realización de secciones transversales y longitudinales con un GPS diferencial *Leica 1200* y la asignación de los parámetros de n para el coeficiente de rugosidad de *Manning* (Arcement y Schneider, 1989), extraído a partir de la siguiente fórmula:

$$n = (nb + n1 + n2 + n3 + n4) m \quad (1)$$

donde:

nb : uniformidad de los materiales del canal

$n1$: grado de irregularidad

$n2$: variación de la sección transversal

$n3$: efecto de la obstrucción

$n4$: vegetación

m : grado de curvatura del canal

n : coeficiente de rugosidad

resultando:

— Biniaraix

$$\begin{aligned} nb: 0,07 \quad n1: 0,001 \quad n2: 0 \quad n3: 0,015 \\ n4: 0,005 \quad m: 1 \quad n: 0,091 \\ \text{pendiente } 0,07 \text{ m m}^{-1} \end{aligned}$$

— Sa Font de la Vila

$$\begin{aligned} nb: 0,027 \quad n1: 0 \quad n2: 0,001 \quad n3: 0,005 \\ n4: 0,010 \quad m: 1 \quad n: 0,043 \\ \text{pendiente } 0,02 \text{ m m}^{-1} \end{aligned}$$

En Biniaraix, semanalmente durante períodos de caudal base y horariamente durante eventos de crecida, se realizaron mediciones de profundidad media de la lámina de agua para estimar el caudal mediante el coeficiente de rugosidad de *Manning*, recogiéndose a la vez una muestra manual de agua y SS (500 ml). En Sa Font de la Vila, se utilizó la sonda de presión anteriormente descrita.

Para determinar la CSS de las muestras manuales y del muestreador de botellas por sifón, se utilizó un equipo de filtraje *Millipore Sterfil* y filtros de celulosa de 0,45 μm .

3.2. Computación y análisis de datos

A partir de la monitorización de ambas secciones se realizó el análisis de la respuesta hidro-sedimentaria a escala evento, mensual y estacional así como para la totalidad del periodo de estudio.

Los diferentes sistemas de monitorización obligaron al uso de diferentes métodos para determinar la CSS y la exportación de SS. En Sa Font de la Vila los valores de CSS se obtuvieron mediante la calibración del turbidímetro.

tro a partir de muestras manuales de agua y SS. La calibración realizada con 10 muestras (4,9 – 14.170,1 mg l⁻¹) resultó una correlación positiva (R²=0,88) con una función potencial. En cuanto a la exportación de SS, esta se obtuvo a partir de la combinación de los registros continuos de CSS calibrados y de caudal. En el Barranc de Biniaraix, los valores de CSS se obtuvieron directamente del filtraje de muestras integradas de agua y SS en intervalos horarios durante el transcurso de los eventos y de muestras semanales de control de caudal base. A partir de estos datos de CSS, se aplicó una interpolación lineal (*inter-sampling*) para determinar el caudal y la exportación de SS en el intervalo temporal entre la recolección de muestras (Phillips *et al.*, 1999; López-Tarazón *et al.*, 2009).

Los datos de precipitación se obtuvieron de la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) y de un pluviómetro de cazoletas instalado en la cabecera de Sa Font de la Vila. Se realizó un análisis de la relación entre la intensidad, la variabilidad temporal y la energía cinética generada para calcular la erosividad, debido a su relevancia como fuerza motriz de los procesos de transferencia de sedimento (Van Dijk *et al.*, 2002). Para ello, se utilizaron las ecuaciones descritas por Brown y Foster (1987):

$$e = 0,29[1 - 0,72 \exp(-0,05i)] \quad (2)$$

donde e es la energía cinética de 1 mm de precipitación expresada en Mj ha⁻¹ mm, i es la intensidad de la precipitación expresada en mm h⁻¹. Finalmente, se determinó la erosividad de la precipitación (R) multiplicando la energía cinética de cada evento con la intensidad máxima de precipitación en treinta minutos (I_{30}) expresando el resultado en MJ mm ha⁻¹ h⁻¹.

$$e * I_{30} = R \quad (3)$$

Estos mismos autores establecen cinco umbrales de erosividad: muy baja (<500 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹), baja (500-1.000 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹), mediana (1.000-3.000 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹), alta (3.000-6.000 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹) y muy alta (>6.000 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹).

Además se calculó el periodo de retorno de la precipitación acumulada en 24 h (T) mediante la aplicación del método Gumbel:

$$\bar{X} = X - \frac{\Delta X}{\Delta n} \left[\ln \left(\frac{T}{T-1} \right) + Y_n \right] \quad (4)$$

donde \bar{X} es la precipitación máxima diaria en 24 horas para un periodo de retorno T ; ΔX es la desviación estándar de los datos disponibles; X es la media de la precipitación máxima disponible e Y_n y Δn son los factores que dependen del número de datos disponible.

4. Resultados

4.1. Precipitación

A lo largo del año hidrológico 2013-14, la precipitación acumulada fue de 517 mm en Sa Font de la Vila y 1.453 mm en Biniaraix. En ambos casos, la estación en la que se registró una mayor precipitación acumulada fue otoño, con 359 y 786 mm respectivamente. Los valores máximos mensuales en Sa Font de la Vila se corresponden con los meses de noviembre (177 mm), diciembre (118 mm) y octubre (64 mm). En Biniaraix corresponde a los meses de noviembre (435 mm), diciembre (319 mm) y abril (183 mm), superando también los 100 mm mensuales en enero y septiembre (161 y 116 mm).

La intensidad media de la precipitación para eventos de más de 25 mm en el periodo de estudio en Sa Font de la Vila fue de 20,6 mm h⁻¹ a partir de los valores registrados de I_{30} , dando como resultado una erosividad media de 571,6 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹, clasificada como baja. Solamente seis eventos superaron los 25 mm de precipitación acumulada (48% del total) en Sa Font de la Vila, registrándose el máximo el 29/10/2013 57,2 mm con una I_{30} máxima de 50 mm h⁻¹ y una erosividad de 3.023,7 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹, siendo clasificada como alta.

En el Barranc de Biniaraix la intensidad y erosividad medias de la precipitación fueron de 19,3 mm h⁻¹ y 546,3 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ respectivamente. Se registraron 14 eventos de más de 25 mm, acumulando 998 mm que supusieron

el 69% de la precipitación total del período de estudio (1.453 mm). El evento con mayor volumen de precipitación fue el del 19/12/2013 registrando 177 mm, una I_{30} máxima de 13,2 mm h^{-1} y una erosividad baja de 656 MJ mm $ha^{-1} h^{-1}$. Durante el periodo monitorizado, el mayor evento se produjo el 03/04/2014, cuando se registraron 143 mm en 27 horas, una I_{30} máxima de 17 mm h^{-1} y una erosividad de 1.253,7 MJ mm $ha^{-1} h^{-1}$ clasificada como media.

4.2. Escorrentía

Las marcadas diferencias en los registros pluviométricos dan lugar a respuestas hidrológicas muy distintas en cada cuenca objeto de estudio (Tabla 1). En Sa Font de la Vila, el caudal medio fue de 0,001 $m^3 s^{-1}$ (caudal específico $1,7 \cdot 10^{-4} m^3 s^{-1} km^{-2}$), la escorrentía 5,3 mm (aportación 0,026 hm^3) con un coeficiente de escorrentía del 1,0%. El mes que generó la mayor escorrentía fue diciembre (3,1 mm) con un coeficiente de escorrentía del 2,6%,

seguido de los meses de noviembre (1,4 mm) y octubre (0,8 mm) con coeficientes de escorrentía de 0,8% y 1,2% respectivamente. En los meses restantes, pese a haberse producido precipitación, no se generó escorrentía superficial. Dicha generación, por tanto, tuvo lugar exclusivamente en otoño como respuesta a 4 de los 5 eventos de precipitación (Fig. 2). Los picos máximos de caudal de los cuatro eventos (29/10/13; 19/11/13; 01/12/13; 20/12/13) oscilaron entre 0,08 y 1,50 $m^3 s^{-1}$. En valores relativos a la aportación del periodo de estudio, los cuatro eventos supusieron el 100% del caudal.

En Biniaraix se registró un caudal medio de 0,081 $m^3 s^{-1}$ (caudal específico 0,02 $m^3 s^{-1} km^{-2}$), una escorrentía de 470 mm (aportación 2,08 hm^3) y un coeficiente de escorrentía del 66,8% en el periodo monitorizado. Desde el inicio del periodo monitorizado hasta el 03/05/2014 hubo presencia de caudal base. Estacionalmente los periodos con mayor escorrentía fueron invierno con 280 mm y pri-

Tabla 1: Valores mensuales de precipitación, escorrentía, coeficiente de escorrentía y aportación hidrológica de las cuencas del Torrent de Sa Font de la Vila y del Barranc de Biniaraix.

Table 1: Monthly and total rainfall, runoff, runoff coefficient and hydrological contribution for Sa Font de la Vila and Biniaraix catchments.

AÑO HIDROLÓGICO 2013-2014	Precipitación (mm)		Escorrentía (mm)		Coef. Escorrentía (%)		Aportación (hm^3)	
	Font de la Vila	Biniaraix	Font de la Vila	Biniaraix	Font de la Vila	Biniaraix	Font de la Vila	Biniaraix
Octubre	64,2	32,0	0,8	ND	1,2	ND	0,004	ND
Noviembre	176,8	435,4	1,4	ND	0,8	ND	0,007	ND
Diciembre	117,8	318,6	3,1	ND	2,6	ND	0,015	ND
Enero	48,0	161,4	0,0	223,9	0,0	138,7	0,000	0,992
Febrero	17,4	60,4	0,0	25,2	0,0	41,7	0,000	0,112
Marzo	21,8	87,8	0,0	31,0	0,0	35,3	0,000	0,137
Abril	50,4	183,2	0,0	183,2	0,0	100,0	0,000	0,812
Mayo	8,4	17,0	0,0	1,0	0,0	6,0	0,000	0,005
Junio	12,4	25,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,000	0,000
Julio	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,000	0,000
Agosto	0,0	16,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,000	0,000
Septiembre	0,0	115,6	0,0	ND	0,0	ND	0,000	ND
Total	517,2	1.453,2	5,3	469,5*	1,0	66,8*	0,026	2,080*

* Datos correspondientes únicamente al periodo de 22/12/2013 a 28/09/2013

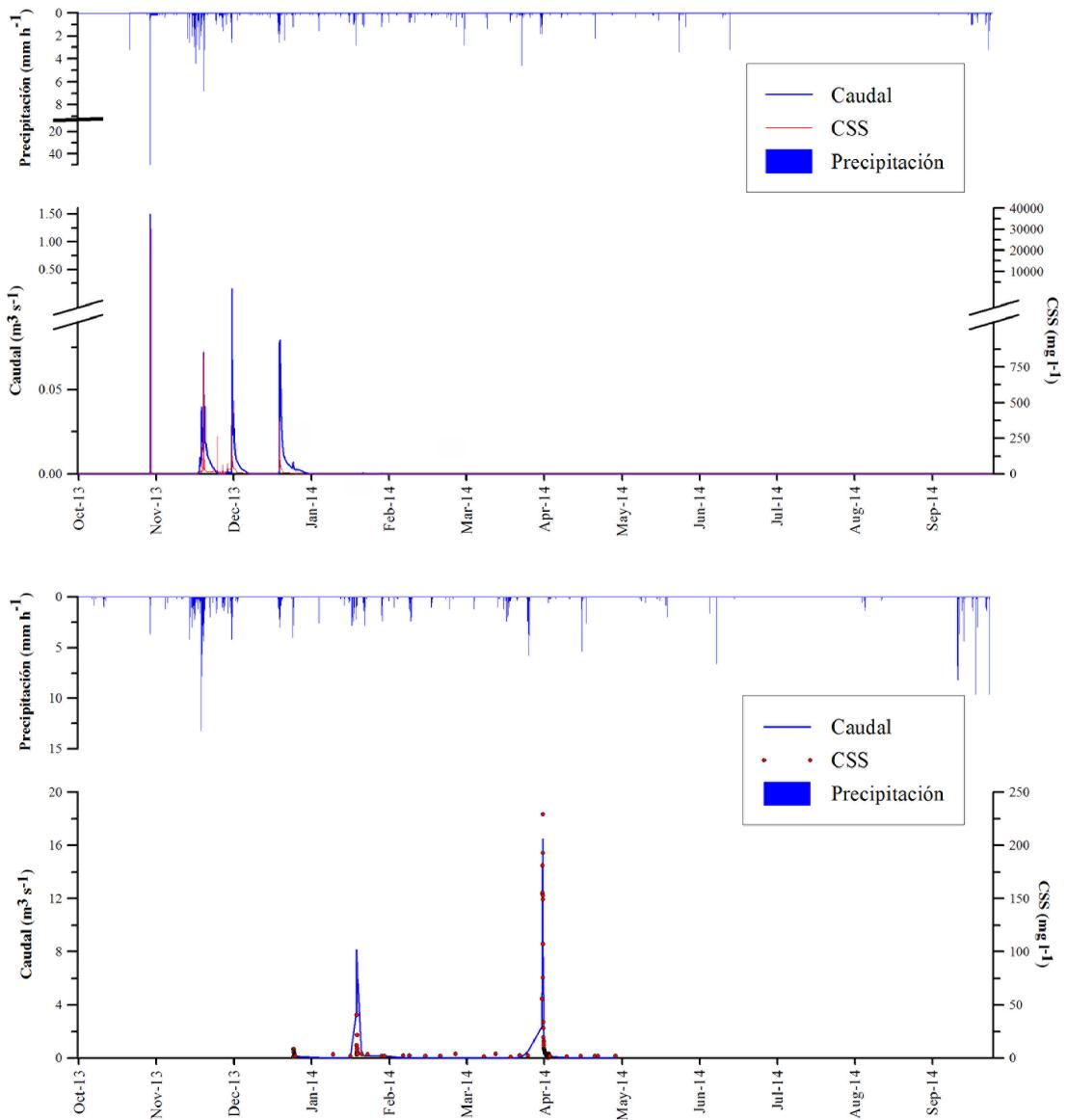


Figura 2: Hidrograma, sedigrama y hietograma del año hidrológico 2013-14 en las secciones de Sa Font de la Vila (arriba) y Biniaraix (abajo).

Figure 2: Hydrograph, sedigraph and hietograph for the hydrological year 2013-2014 at Sa Font de la Vila and Biniaraix gauging sections.

mavera con 184 mm, siendo el coeficiente de escorrentía del 90,5% y 81,5% respectivamente. Estos valores estacionales se corresponden principalmente con los meses de enero (224 mm) y abril (183 mm), estableciéndose un coeficiente de escorrentía del 138,7% y 100% respectivamente. Hubo presencia de caudal base en los meses de febrero y marzo

con una escorrentía de 25 mm y 31 mm, respectivamente. Durante el periodo de estudio, en Biniaraix se generaron tres eventos (Figura 2; 25/12/13; 19/01/14, 03/04/14). Los picos máximos de caudal fueron de $0,67 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, $8,15 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ y $15,53 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. En valores relativos a la aportación del periodo de estudio, los tres eventos concentraron el 36% del caudal.

4.3. Transporte de sedimento en suspensión

En Sa Font de la Vila la exportación de SS fue de 111 t, estableciéndose una producción de SS de 23,2 t km² (Tabla 2). En el primer evento (29/10/13) se exportaron 23 t de SS, registrando la máxima CSS (33.618 mg l⁻¹) del periodo de estudio. La media de CSS en dicho evento fue de 17.000 mg l⁻¹ en respuesta a un evento de precipitación de elevada erosividad. El total de la exportación de SS se produjo en la estación de otoño, cuando se registraron otros tres eventos (19/11/13; 01/12/13; 20/12/13) con máximos de CSS muy inferiores, oscilando entre 391 y 867 mg l⁻¹ y una media de 97 mg l⁻¹, suponiendo el 0,4% restante del total de SS.

En Biniaraix, la exportación de SS fue de 63 t, con una producción de 14,2 t km² (Tabla 2). La CSS media fue de 2,3 mg l⁻¹ con un máximo de 229,0 mg l⁻¹ en un evento registrado el mes de abril. La mayor exportación de SS a nivel estacional se corresponde a la primavera (94,2%) seguida del invierno (5,7%). A escala mensual, la mayor exportación de SS se produjo en abril (59 t) y enero (3 t) debido a las crecidas ocurridas. En los meses con presencia de caudal base (i.e., febrero y marzo), la exportación de SS fue solamente de 0,3 t y 0,4 t respectivamente. En cambio, la exportación de SS de los tres eventos supuso el 97,5% del total registrado, destacándose que el 93,4% se corresponde a la crecida ocurrida el 3 de abril de 2014, cuando precipitaron 145 mm en 27 horas. Durante este evento, el

pico máximo de CSS fue de 229,0 mg l⁻¹, la CSS media de 25,2 mg l⁻¹ y la exportación total de SS fue de 59 t (producción de 13,3 t km²). En la crecida del 19/01/2014 la exportación fue de 2,5 t (3,9% del total), con una CSS media de 12,7 mg l⁻¹ y un pico máximo de CSS de 40,9 mg l⁻¹, generados por una precipitación de 43 mm en 6 horas. Durante el evento del 25/12/2013, generado por una precipitación de 36 mm en 10 horas, hubo una exportación de 0,07 t (i.e. 0,1% del total) con una CSS media de 3,6 mg l⁻¹ y un pico máximo de CSS de 8,4 mg l⁻¹.

5. Respuesta hidro-sedimentaria

El análisis detallado de cada uno de los eventos de precipitación registrados en ambas cuencas de estudio, relacionando la precipitación (i.e. total acumulado en cada evento, intensidad máxima y condiciones antecedentes) y el flujo de agua y SS (Tabla 3) permitirá conocer la respuesta hidro-sedimentaria en el periodo de estudio.

En los dos años posteriores a un incendio forestal, la desaparición de la cobertura vegetal, los cambios en las propiedades del suelo y una mayor disponibilidad de sedimento deberían favorecer un aumento de la escorrentía y de la transferencia de sedimento (Shakesby, 2011; Warrick *et al.*, 2012). No obstante, los registros totales en la cuenca de Sa Font de la

Tabla 2. Exportación y producción estacional y total de sedimento en suspensión en las cuencas del Torrent de Sa Font de la Vila y del Barranc de Biniaraix.

Table 2. Total and seasonal suspended-sediment load and yield for Sa Font de la Vila and Biniaraix catchments.

AÑO HIDROLÓGICO 2013-14	Exportación (t)		Producción (t km ⁻²)	
	Font de la Vila	Biniaraix	Font de la Vila	Biniaraix
Otoño	111,34	0,08*	23,19	0,02*
Invierno	0,00	3,59	0,00	0,81
Primavera	0,00	59,37	0,00	13,40
Verano	0,00	0,00*	0,00	0,00*
TOTAL	111,34	63,04*	23,19	14,23*

* Datos correspondientes únicamente al periodo de 22/12/2013 a 28/09/2013

Tabla 3. Características principales de los eventos de precipitación y su correspondiente respuesta hidro-sedimentaria durante el período de estudio en las cuencas de Sa Font de la Vila y Biniaraix.

Table 3. Main characteristics of precipitation events and corresponding hydro-sedimentary response during the study period in the catchments of Sa Font de la Vila and Biniaraix.

Sa Font de la Vila		Precipitación			Respuesta hidro-sedimentaria		
EVENTOS (Fecha inicio)	Precipitación acumulada (mm)	I ₃₀ máx (mm)	P. Antecedente 7 días (mm)	Erosividad (MJ mm ha ⁻¹ h ⁻¹)	Q máx (m ³ s ⁻¹)	CSS máx (mg l ⁻¹)	
29/10/2013	57,2	100,0	ND	3.023,7	1,50	33.618,0	
15/11/2013	27,4	6,0	23,2	58,4	0,00	0,0	
18/11/2013	25,8	4,0	91,8	40,0	0,04	27,0	
01/12/2013	29,0	5,2	30,2	80,1	0,15	461,4	
19/12/2013	68,2	5,2	0,2	166,3	0,09	147,0	
03/04/2014	41,0	3,2	3,2	60,9	0,00	0,0	
Biniaraix		Precipitación			Respuesta hidro-sedimentaria		
EVENTOS (Fecha inicio)	Precipitación acumulada (mm)	I ₃₀ máx (mm)	P. Antecedente 7 días (mm)	Erosividad (MJ mm ha ⁻¹ h ⁻¹)	Q máx (m ³ s ⁻¹)	CSS máx (mg l ⁻¹)	
15/11/2013	70,2	11,2	108,8	215,0	ND	ND	
18/11/2013	115,6	52,4	108,8	2.359,7	ND	ND	
19/11/2013	72,8	36,8	118,8	966,3	ND	ND	
27/11/2013	33,6	5,6	55,4	42,2	ND	ND	
30/11/2013	118,4	22,4	69,6	858,8	ND	ND	
19/12/2013	176,6	13,2	0,0	656,0	ND	ND	
25/12/2013	35,8	14,8	174,4	167,1	0,67	8,4	
19/01/2014	42,6	8,0	9,8	82,1	8,15	40,9	
22/01/2014	38,6	7,6	72,8	69,5	0,20	4,0	
30/01/2014	36,4	12,0	40,6	118,6	0,17	2,2	
10/02/2014	28,4	13,2	3,2	109,6	0,02	2,4	
26/03/2014	52,4	12,4	11,0	196,9	0,02	2,4	
03/04/2014	145,4	26,0	6,0	1.253,7	15,50	229,4	
29/09/2014	31,0	35,2	74,6	553,1	ND	ND	

Vila, en la que el 71% de su superficie se vio afectada por el fuego en julio de 2013, muestran valores bajos en cuanto a escorrentía (5,3 mm) y producción de sedimento (23,2 t km⁻²). Aunque las precipitaciones anuales fueron representativas de las dinámicas a largo plazo (YACU, 2002), la respuesta hidro-sedimentaria mostró un comportamiento altamente efímero ya que un único evento (i.e. 29/10/13) de alta intensidad (i.e. 200 mm h⁻¹) dio lugar a una punta de caudal de 1,5 m³s⁻¹ generando el 99,6% del total de exportación de SS a lo largo del periodo. Este evento tuvo

lugar 3 meses después del incendio dando lugar a una mayor disponibilidad de sedimento en forma de cenizas y suelos disgregados. Esto favoreció que la respuesta sedimentaria registrara CSS muy altas (i.e. 33.618 mg l⁻¹) en relación a los datos obtenidos de CSS en Sa Font de la Vila o Biniaraix. El resto de eventos de precipitación registrados a lo largo del periodo -4 eventos en otoño de 2013 y uno en primavera del 2014- exhibieron intensidades bajas o moderadas (i.e., I₃₀ ≤ 6 mm) superando levemente los 25 mm acumulados de precipitación. Incluso, en algunos casos, con con-

diciones antecedentes húmedas (i.e., 92 mm en la semana previa al evento del 18/11/13), la respuesta hidrológica de estos eventos de menor intensidad fue de uno o dos órdenes de magnitud inferior (i.e., $Q_{\max} \leq 0,15 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$) y la exportación de SS representó solo el 0,4% del total de exportación de SS.

En la cuenca de Biniaraix, la mayor frecuencia y volumen de precipitaciones (no en cambio de intensidad) dio lugar a una respuesta hidrológica muy superior a la de Sa Font de la Vila, pese a no verse afectada por incendios forestales. Durante el año hidrológico 2013-14 se produjeron 14 eventos que superaron los 25 mm acumulados (Tabla 3), de los cuales 4 superaron los 100 mm, alcanzando los 177 mm en el evento de 19/12/2013. A pesar de no disponer de datos hidro-sedimentarios en otoño, la estación más lluviosa (la monitorización de Biniaraix se inició el 22/12/2013), durante el resto del período de estudio se registró una aportación hidrológica de 2 hm^3 y una producción de sedimento de $14,0 \text{ t km}^{-2}$. La sucesión de eventos entre otoño y primavera, con precipitaciones estacionales acumuladas importantes (i.e., 786 mm en otoño, 310 mm en invierno y 226 mm en primavera), favorecieron la saturación del suelo generándose un caudal base que osciló entre $0,004$ y $0,166 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ desde el inicio de los registros hasta el día 03/05/2014. Dicha respuesta hidrológica se refleja en altos coeficientes de escorrentía en invierno (82,0%), con precipitaciones más frecuentes y moderadas ($\leq 52 \text{ mm}$), y en primavera (91,0%), cuando un solo evento de alta intensidad ($I_{30} = 26 \text{ mm}$) acumuló 145 mm. Este último evento generó un caudal máximo que alcanzó los $15,5 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, concentrando el 93% ($13,0 \text{ t km}^{-2}$) del total de exportación de SS. El evento del 25/12/2013, acumulando un volumen muy inferior de precipitación (36 mm), alcanzó un pico de caudal mayor de $0,67 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ debido a unas condiciones antecedentes favorables (174 mm de precipitación en 7 días) y una intensidad máxima de 14,8 mm en media hora. Por el contrario, otros eventos con volúmenes comparables de precipitación acumulada (i.e., 22/01/2014; 30/01/2014; 10/02/2014; 26/03/2014) no generaron esco-

rrentía ya que las condiciones antecedentes eran menos húmedas y las intensidades de precipitación fueron ligeramente inferiores. El evento ocurrido el 19/01/2014, a pesar de ser de baja magnitud e intensidad (punta de caudal de $8,15 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ con una precipitación de 43 mm, I_{30} de 8 mm y condiciones antecedentes de precipitación de 10 mm en 7 días), generó el 8% de la aportación hidrológica total del periodo debido a las aportaciones kársticas alóctonas, viéndose reflejadas en el coeficiente de escorrentía de enero (Tabla 1), que alcanzó un valor del 138,7%. Del mismo modo, el evento del 03/04/2014 contó con aportaciones kársticas alóctonas como indica el coeficiente de escorrentía de abril que alcanzó el 100%.

6. Discusión

La precipitación y sus características (i.e., magnitud, frecuencia, intensidad y precipitación antecedente) han sido identificados por diversos autores como los factores más determinantes para la generación de escorrentía y el transporte de sedimento, en especial en cuencas afectadas por incendios forestales, más incluso que la vulnerabilidad intrínseca que debería suponer la ventana de perturbación post-incendio (Gimeno-García *et al.*, 2007; Moody y Martin, 2009; Smith *et al.*, 2011). No obstante, la comprensión de las respuestas hidro-sedimentarias exige contemplar múltiples factores (i.e. litología, presencia de estructuras de conservación del suelo, gradiente clinométrico y aportaciones kársticas alóctonas) que pueden influir de forma significativa, imponiendo diferentes umbrales de precipitación para la generación de escorrentía y la transferencia de sedimento en las cuencas estudiadas.

El análisis de dichas cuencas evidencia diferencias importantes en las respuestas hidrológicas, a pesar de sus características afines de superficie, litología, presencia masiva de estructuras de conservación del suelo y procesos de abandono y forestación. Arnáez *et al.* (2015) establecieron, en base a revisión de la literatura científica, que el abandono de

tierras agrícolas abancaladas suele generar coeficientes de escorrentía que oscilan entre el 20% y 40% dependiendo del porcentaje de la cobertura vegetal, pudiendo reducirse entre el 10% y 25% en climas templados y húmedos. El coeficiente de escorrentía en Sa Font de la Vila (1%), por tanto, puede considerarse muy bajo; únicamente comparable con cuencas de drenaje con características climáticas similares donde las pérdidas por transmisión son muy elevadas debido a la permeabilidad de la litología (Tzorakis y Nikolaidis, 2007; Estrany *et al.*, 2010). No obstante, el coeficiente de escorrentía del periodo de estudio de la cuenca de Biniaraix fue del 67%. En ambas cuencas, la elevada capacidad de infiltración de los suelos calizos (Calvo-Cases *et al.*, 2003) y la importante extensión de la superficie aterrazada (37% en Sa Font de la Vila y 36% en Biniaraix) imponen umbrales altos de precipitación para la generación de escorrentía (Lasanta *et al.*, 2001; Cammeraat, 2004) que son superados con mayor frecuencia en la cuenca de Biniaraix. Asimismo, las notables aportaciones kársticas alóctonas en esta última cuenca contribuyen a aumentar su respuesta hidro-sedimentaria, además del elevado gradiente clinométrico (81%), factor clave en la generación de escorrentía y en la erosión en cuencas abancaladas (Koulouri y Giourga, 2007).

En cuanto a la exportación de SS, las dos cuencas analizadas muestran valores bajos si se comparan con cuencas de características análogas, tanto afectadas (i.e., 456 t km² en Mayor *et al.*, 2007) como no (i.e., 90 t km² en Iroumé, 1990; 732 t km² en Pavanelli y Pagliarini, 2002) por incendios forestales. La respuesta sedimentaria en ambas cuencas se produjo en su práctica totalidad (99,6% en Sa Font de la Vila y el 93% en Biniaraix) durante un solo evento de elevada intensidad de precipitación de acuerdo con el carácter efímero de los procesos sedimentarios que caracteriza las cuencas mediterráneas (Estrany *et al.*, 2009; De Girolamo *et al.*, 2015). Como se apuntaba, este mismo comportamiento ya fue descrito en cuencas mediterráneas afectadas por incendios forestales. Así, Ma-

yor *et al.* (2007) describieron que durante un periodo de estudio de 7 años, el 75% del SS se exportó en un solo evento generado por una precipitación de 98 mm en 15 minutos. Así pues, la transferencia de sedimento en las cuencas estudiadas solo se produce por la ocurrencia de eventos torrenciales de precipitación con una capacidad erosiva y de generación de escorrentía superficial elevada que permita activar los procesos de transporte y transferencia de sedimento. En este sentido, en ambas cuencas, las litologías calizas porosas (Calvo-Cases *et al.*, 2003) no favorecen la disponibilidad de sedimentos y las estructuras de conservación del suelo impiden la concentración del flujo superficial combatiendo los procesos erosivos y contribuyendo a la retención de los suelos (Cammeraat, 2004; Lesschen *et al.*, 2009) allí donde estos muestran un mayor desarrollo.

7. Conclusiones

En este estudio se ha analizado la respuesta hidro-sedimentaria de dos cuencas representativas de las dinámicas del cambio global en ambientes mediterráneos, incluyendo la construcción de estructuras de conservación del suelo para el uso agrícola hasta los años 60 del siglo XX y el abandono de los cultivos, seguido de procesos de forestación y de la afectación por incendios forestales en una de las cuencas. Las características pluviométricas han sido identificadas como el factor más determinante en las dinámicas hidro-sedimentarias. La ubicación de las cuencas en distintas áreas de afinidad de precipitación en la isla de Mallorca (i.e., 517 mm en Sa Font de la Vila frente a 1.453 mm de precipitación anual en Biniaraix) ha permitido observar que, además de los volúmenes de precipitación y condiciones antecedentes, la respuesta hidro-sedimentaria está controlada por la intensidad de precipitación, aunque mayoritariamente en condiciones antecedentes de saturación del suelo (Latron *et al.*, 2008). De esta forma, la mayor frecuencia de precipitaciones en la cuenca de Biniaraix, con acumulados e intensidades importantes dieron lugar a una elevada saturación del suelo y a la

generación de escorrentía durante gran parte del periodo de estudio. En cambio, en Sa Font de la Vila, la respuesta hidrológica mostró un comportamiento altamente efímero debido a una menor frecuencia y magnitud de las precipitaciones que no permitían condiciones de saturación edáfica.

A pesar de las marcadas diferencias en el comportamiento hidrológico, ambas cuencas muestran valores comparables de producción de SS, considerados muy bajos (i.e., $< 25 \text{ t km}^2 \text{ a}^{-1}$) para el conjunto de la Europa mediterránea (Vanmaercke *et al.*, 2011). De esta manera, se observa que –con un 61% menos de precipitación– la cuenca de Sa Font de la Vila obtuvo una producción de SS mayor a la de Biniaraix como respuesta a un evento torrencial de precipitación en el momento de máxima apertura de la ventana de perturbación, *ergo* tres meses después de un incendio forestal que afectó al 71% de su superficie. En conjunto, en ambas cuencas la producción de sedimento tiene lugar únicamente como respuesta a la ocurrencia de eventos torrenciales de precipitación ya que la elevada capacidad de infiltración y el bajo desarrollo edáfico de las litologías calizas así como la capacidad de retención y laminación de las estructuras de conservación del suelo limitan la generación de escorrentía y la transferencia de sedimentos.

El estudio en profundidad de dichos factores y su capacidad de control ante los eventos de precipitación se plantea, consecuentemente, como un reto muy necesario para mejorar la comprensión de los procesos hidrosedimentarios en cuencas mediterráneas. Al mismo nivel, la existencia de aportaciones kársticas alóctonas relacionadas con las litologías carbonatadas muestra una influencia notable en la respuesta hidrológica, abriendo nuevas oportunidades de estudio para trabajos futuros.

Agradecimientos

Esta investigación es financiada por el Servei de Gestió Forestal i Conservació del Sòl del

Govern de les Illes Balears y por el proyecto de investigación CGL2012-32446 “Assessing hydrological and sediment connectivity in contrasting Mediterranean catchments. Impacts of Global Change-MEDhyCON” financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad. Los datos meteorológicos fueron facilitados por la Agencia Estatal de Meteorología –AEMET.

Bibliografía

- Arcement Jr, G. J.; Schneider, V.R. (1989). Guide for Selecting Manning’s Roughness Coefficients for Natural Channels and Flood Plains. *United States Geological Survey Water-supply Paper*, 2339.
- Arnáez J, Lana-Renault N, Lasanta T, Ruiz-Flaño P, Castroviejo J. (2015). Effects of farming terraces on hydrological and geomorphological processes. A review. *CATENA*, 128, 122-134. <http://dx.doi.org/10.1016/j.catena.2015.01.021>
- Batalla, R.J. (1993). *Sand-bed transport contribution to the sediment budget of a granitic Mediterranean drainage basin*. Unpublished PhD Thesis. University of Barcelona: Barcelona.
- Bellin N, van Wesemael B, Meerkerk A, Vanacker V, Barbera GG. 2009. Abandonment of soil and water conservation structures in Mediterranean ecosystems: a case study from south east Spain. *Catena* 76: 114–121. <http://dx.doi.org/10.1016/j.catena.2008.10.002>
- Brown, L.C.; Foster, G.R. (1987). Storm erosivity using idealized intensity distributions. *Transactions of the ASAE-American Society of Agricultural Engineers (USA)*, 30, 379-386.
- Buendía, C.; Bussi, G.; Tuset, J.; Vericat, D.; Sabater, S.; Palau, A.; Batalla, R.J.; (2015). Effects of afforestation on runoff and sediment load in an upland Mediterranean catchment. *Science of The Total Environment*, 540, 144-157. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.07.005>
- 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, 269-291. [http://dx.doi.org/10.1016/S0169-555X\(02\)00218-0](http://dx.doi.org/10.1016/S0169-555X(02)00218-0)
- Cammeraat, E.L. (2004). Scale dependent thresholds in hydrological and erosion response

- of a semi-arid catchment in southeast Spain. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 104, 317-332. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agee.2004.01.032>
- Cerdà A.; Doerr SH. (2005). Influence of vegetation recovery on soil hydrology and erodibility following fire: an 11-year investigation. *International Journal of Wildland Fire* 14(4) 423-437. <http://dx.doi.org/10.1071/WF05044>
- De Girolamo, A.M.; Pappagallo, G.; Lo Porto, A. (2015). Temporal variability of suspended sediment transport and rating curves in a Mediterranean river basin: The Celone (SE Italy). *CATENA*, 128, 135-143. <http://dx.doi.org/10.1016/j.catena.2014.09.020>
- Estrany, J.; Garcia, C.; Batalla, R.J. (2009). Suspended sediment transport in a small Mediterranean agricultural catchment. *Earth Surface Processes and Landforms*, 34(7), 929-940. <http://dx.doi.org/10.1002/esp.1777>
- Estrany, J.; Garcia, C.; Alberich, R. (2010). Streamflow dynamics in a Mediterranean temporary river. *Hydrological Sciences Journal*, 55(5), 717-736. <http://dx.doi.org/10.1080/02626667.2010.493740>
- FAO (2006). *Guidelines for soil description*. 4^a Ed. (revisada). Soil Resources, Management and Conservation Service, Land and Water Development Division. FAO, Roma, 70 pp.
- FAO, (2014). *El estado de los bosques 2014*. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, Roma, 146 pp.
- Jimeno-García, E.; Andreu, V.; Rubio, J.L. (2007). Influence of vegetation recovery on water erosion at short and medium-term after experimental fires in a Mediterranean shrubland. *CATENA*, 69, 150-160. <http://dx.doi.org/10.1016/j.catena.2006.05.003>
- Grimalt, M.; Blázquez, M.; Rodríguez, R. (1992). Physical factors, distribution and present land use of terraces in the Tramuntana Range. *Pirineos*, 139, 15-25. <http://dx.doi.org/10.3989/pirineos.1992.v139.179>
- Guijarro, J.A. (1986). *Contribución a la Bioclimatología de Baleares*. Resumen de Tesis Doctoral, Universitat de les Illes Balears, 36 pp.
- Hooke, J.M. (2006). Human impacts on fluvial systems in the Mediterranean region. *Geomorphology*, 79, 311-335. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geomorph.2006.06.036>
- Inbar, M.; Tamir, M.; Wittenberg, L. (1998). Runoff and erosion processes after a forest fire in Mount Carmel, a Mediterranean area. *Geomorphology*, 24, 17-33. [http://dx.doi.org/10.1016/s0169-555x\(97\)00098-6](http://dx.doi.org/10.1016/s0169-555x(97)00098-6)
- IPCC, (2014). *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability*. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Field, C.B., V.R. Barros, D.J. Dokken, K.J. Mach, M.D. Mastrandrea, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea, and L.L. White (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1132 pp.
- Iroumé, A. (1990). Assessment of runoff and suspended sediment yield in a partially forested catchment in Southern Chile. *Water Resources Research*, 26, 2637-2642. <http://dx.doi.org/10.1029/90wr00839>
- Kim, D.H.; Sexton, J.O.; Noojipady, P.; Huang, C.; Anand, A.; Channan, S.; Townshend, J.R. (2014). Global, Landsat-based forest-cover change from 1990 to 2000. *Remote Sensing of Environment*, 155, 178-193. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2014.08.017>
- Koulouri, M., Giourga, C., 2007. Land abandonment and slope gradient as key factors of soil erosion in Mediterranean terraced lands. *Catena* 69, 274-281. <http://dx.doi.org/10.1016/j.catena.2006.07.001>
- Lasanta, T.; Arnáez, J.; Oserín, M.; Ortigosa, L.M. (2001). Marginal lands and erosion in terraced fields in the Mediterranean mountains: a case study in the Camero Viejo (Northwestern Iberian System, Spain). *Mountain Research and Development*, 21, 69-76. [http://dx.doi.org/10.1659/0276-4741\(2001\)021\[0069:MLA EIT\]2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1659/0276-4741(2001)021[0069:MLA EIT]2.0.CO;2)
- Latron, J.; Soler, M.; Llorens, P.; Gallart, F. (2008). Spatial and temporal variability of the hydrological response in a small Mediterranean research catchment (Vallcebre, Eastern Pyrenees). *Hydrological Processes*, 22(6), 775-787. <http://dx.doi.org/10.1002/hyp.6648>
- Lesschen, J.P., Cammeraat, L.H., Nieman, T., 2008. Erosion and terrace failure due to agricultural land abandonment in a semi-arid environment. *Earth Surf. Process. Landf.* 33, 1574-1584. <http://dx.doi.org/10.1002/esp.1676>
- 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 (3-4), 174-183. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geomorph.2009.02.030>
- López-Vicente, M., Poesen, J., Navas, A., Gaspar, L., 2013. Predicting runoff and sediment connec-

- tivity and soil erosion by water for different land use scenarios in the Spanish Pre-Pyrenees. *Catena*. <http://dx.doi.org/10.1016/j.catena.2011.01.001>.
- López-Tarazón, J.A.; Batalla, R.J.; Vericat, D.; Francake, T. (2009). Suspended sediment transport in a highly erodible catchment: the River Isábena (Southern Pyrenees). *Geomorphology*, 109, 210-221. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geomorph.2009.03.003>
- MacDonald, D.; Crabtree, J.R.; Wiersinger, G.; Dax, T.; Stamou, N.; Fleury, P.; Lazpita, J.G.; Gibon, A. (2000). Agricultural abandonment in mountain areas of Europe: environmental consequences and policy response. *Journal of Environmental Management*, 59, 47-69. <http://dx.doi.org/10.1006/jema.1999.0335>
- Mayor, A.G.; Bautista, S.; Llovet, J.; Bellot, J. (2007). Post-fire hydrological and erosional responses of a Mediterranean landscape: Seven years of catchment-scale dynamics. *CATENA*, 71, 68-75. <http://dx.doi.org/10.1016/j.catena.2006.10.006>
- Ministerio de Agricultura (1971). *Inventario Forestal Nacional Baleares*. Dirección General de Montes, Caza y Pesca Fluvial. Subdirección de Defensa de la Riqueza Forestal. Sección de Estudios Técnicos. 86 pp.
- Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente (2011). *Inventario Forestal Nacional Illes Balears*. Dirección General de Desarrollo Rural y Política Forestal. Área de Inventario y Estadísticas Forestales. 48 pp.
- Moody, J.A.; Martin, D.A. (2009). Synthesis of sediment yields after wildland fire in different rainfall regimes in the western United States. *International Journal of Wildland Fire*, 18, 96-115. <http://dx.doi.org/10.1071/WF07162>
- Morán-Tejada, E.; Ceballos-Barbancho, A.; Llorente-Pinto, J.M. (2010). Hydrological response of Mediterranean headwaters to climate oscillations and land-cover changes: The Mountains of Duero River basin (Central Spain). *Global and Planetary Change*, 72, 39-49. <http://dx.doi.org/10.1016/j.gloplacha.2010.03.003>
- Norrant, C.; Douguédroit, A. (2006). Monthly and daily precipitation trends in the Mediterranean (1950- 2000). *Theoretical and Applied Climatology*, 83 (1-4), 89-106. <http://dx.doi.org/10.1007/s00704-005-0163-y>
- Pavanelli, D.; Pagliarani, A. (2002). SW- Soil and Water: Monitoring Water Flow, Turbidity and Suspended Sediment Load, from an Apennine Catchment Basin, Italy. *Biosystems Engineering*, 83, 463-468. <http://dx.doi.org/10.1006/bioe.2002.0126>
- Prosser, I.P.; Williams, L. (1998). The effect of wildfire on runoff and erosion in native Eucalyptus forest. *Hydrological Processes*, 12, 251-265. [http://dx.doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-1085\(199802\)12:2<251::AID-HYP574>3.0.CO;2-4](http://dx.doi.org/10.1002/(SICI)1099-1085(199802)12:2<251::AID-HYP574>3.0.CO;2-4)
- Phillips, J.M.; Webb, B.W.; Walling, D.E.; Leeks, G.J.L. (1999). Estimating the suspended sediment loads of rivers in the LOIS study area using infrequent samples. *Hydrological Processes*, 13, 1035-1050. [http://dx.doi.org/10.1002/\(sici\)1099-1085\(199905\)13:7<1035::aid-hyp788>3.0.co;2-k](http://dx.doi.org/10.1002/(sici)1099-1085(199905)13:7<1035::aid-hyp788>3.0.co;2-k)
- Schick, P.A. (1967): Suspended sampler and bedload trap. En: *Field methods for the study of slope and fluvial processes*. *Rev. Geomorphologie Dynamique*, 17, 181-182.
- Schneider, C.; Laizé, C.L.R.; Acreman, M.C.; Flörke, M. (2013). How will climate change modify river flow regimes in Europe? *Hydrological Earth System Sciences*, 17, 325-339. <http://dx.doi.org/10.5194/hess-17-325-2013>
- Scott, D.F.; Versfeld, D.B.; Lesch, W. (1998). Erosion and sediment yield in relation to afforestation and fire in the mountains of the Western Cape Province, South Africa. *South African Geographical Journal*, 80, 52-59. <http://dx.doi.org/10.1080/03736245.1998.9713644>
- Shakesby, R.A. (2011). Post-wildfire soil erosion in the Mediterranean: Review and future research directions. *Earth-Science Reviews*, 105, 71-100. <http://dx.doi.org/10.1016/j.earsci-rev.2011.01.001>
- Smith, H.G.; Sheridan, G.J.; Lane, P.N.; Nyman, P.; Haydon, S. (2011). Wildfire effects on water quality in forest catchments: a review with implications for water supply. *Journal of Hydrology*, 396, 170-192. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.10.043>
- Sumner, G.; Ramis, C.; Guijarro, J.A. (1993). The spatial organization of daily rainfall over Mallorca, Spain. *International Journal of Climatology*, 13(1), 89-109. <http://dx.doi.org/10.1002/joc.3370130107>
- Tarolli, P., Preti, F., Romano, N., 2014. Terraced landscapes: from an old best practice to a potential hazard for soil degradation due to land abandonment. *Anthropocene*. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ancene.2014.03.002>.
- Tomaz, C.; Alegria, C.; Monteiro, J.M.; Teixeira, M.C. (2013). Land cover change and afforestation of marginal and abandoned agricultural land: A 10 year analysis in a Mediterranean

- region. *Forest Ecology and Management*, 308, 40-49. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2013.07.044>
- Tzorakis, O.; Nikolaidis, N.P. (2007). A generalized framework for modelling the hydrologic and biogeochemical response of a Mediterranean temporary river basin. *Journal of Hydrology*, 346, 112-121. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2007.08.025>
- Úbeda, X.; Outeiro, L. (2009): Physical and chemical effects of fire on soil. En: *Fire Effects on Soils and Restoration Strategies* (A. Cerdà; P.R. Robichaud, eds.). Science Publishers. Endfield, 105-132. <http://dx.doi.org/10.1201/9781439843338-c4>
- Van Dijk, A.I.J.M.; Bruijnzeel, L.A.; Rosewell, C.J. (2002). Rainfall intensity-kinetic energy relationships: a critical literature appraisal. *Journal of Hydrology*, 261, 1-23. [http://dx.doi.org/10.1016/S0022-1694\(02\)00020-3](http://dx.doi.org/10.1016/S0022-1694(02)00020-3)
- Vanmaercke, M.; Poesen, J.; Verstraeten, G.; de Vente, J.; Ocakoglu, F. (2011). Sediment yield in Europe: Spatial patterns and scale dependency. *Geomorphology*, 130(3-4), 142-161. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geomorph.2011.03.010>
- Warrick, J.A.; Hatten, J.A.; Pasternack, G.B.; Gray, A.B.; Goni, M.A.; Wheatcroft, R.A. (2012). The effects of wildfire on the sediment yield of a coastal California watershed. *Geological Society of America Bulletin*, 124(7-8), 1130-1146. <http://dx.doi.org/10.1130/b30451.1>
- Wester T.; Wasklewicz T.; Staley, D. (2014) Functional and structural connectivity within a recently burned drainage basin. *Geomorphology*, 206, 362-373. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geomorph.2013.10.011>
- YACU (2002). *Estudio de caracterización del régimen extremo de precipitaciones en la isla de Mallorca. Memoria*. Secció d'Estudis i Projectes, Direcció General de Recursos Hídrics, Conselleria de Medi Ambient, Govern de les Illes Balears: Palma de Mallorca.

