

## Métodos para la restauración del suelo y recuperación de la cubierta vegetal en un ambiente forestal mediterráneo

P.Hueso González<sup>1</sup>, J.F. Martínez Murillo<sup>1</sup>, M.A. Romero Díaz<sup>2</sup>, J.D. Ruiz Sinoga<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Geografía, Universidad de Málaga. Campus de Teatinos s/n, 29071 Málaga (España)

<sup>2</sup> Departamento de Geografía. Universidad de Murcia, Campus de La Merced. Murcia (España).

[phueso@uma.es](mailto:phueso@uma.es), [jfmmurillo@uma.es](mailto:jfmmurillo@uma.es); [arodi@um.es](mailto:arodi@um.es); [sinoga@uma.es](mailto:sinoga@uma.es)

**RESUMEN:** Esta investigación, evalúa la incidencia de cinco enmiendas orgánicas en un proceso de repoblación forestal. Se ensayó una estrategia diferente de restauración en parcelas experimentales con sus respectivas replicas: i) mulch de paja; ii) mulch de restos de poda (*Pinus halepensis* L.); iii) polímeros hidroabsorbentes (Terracottem) ; iv) lodos de depuradora; v) estiércol de origen vacuno, utilizando dosis de 10 Mg ha<sup>-1</sup>. Todas las parcelas fueron reforestadas con especies de matorral mediterráneo, siguiendo el mismo patrón espacial.

Tras cuatro años de estudio, los lodos de depuradora, el estiércol de origen vacuno y los polímeros hidroabsorbentes, no resultaron enmiendas efectivas para mitigar los procesos de degradación del suelo o favorecer la restauración de la cubierta vegetal. Al contrario, los tratamientos de mulch de paja y mulch de astillas de poda de Pino halepensis (*Pinus halepensis* Mill.) resultaron métodos efectivos, para la restauración conforme a la hipótesis general planteada. No obstante, observamos que estas enmiendas no habían generado cambios suficientes en las propiedades químicas como para explicar los cambios encontrados en la supervivencia de los individuos, aunque si cambios estructurales en el suelo, pues con su volteo y mezcla aparecieron nuevos canales y macroporos en el perfil del suelo. Estos macroporos fueron la causa del efecto positivo descrito en la escorrentía, respecto al control, cuando los suelos eran enmendados con paja o poda. Así, la adición de un mulch de paja/poda al suelo forestal había conseguido reducir las tasas de escorrentía del orden de un 65-75% y las pérdidas de suelo en un 98-99% respecto a los suelos reforestados y no enmendados.

**Palabras-clave:** enmiendas, humedad, erosión, reforestación

### 1. INTRODUCCIÓN

La pérdida de suelo por erosión hídrica constituye un problema grave en zonas mediterráneas (Lal, 1999). Por este motivo, nuevas estrategias están siendo implementadas con el fin de disminuir las pérdidas de suelo y mantener la funcionalidad de los sistemas ecogeomorfológicos (Macci et al., 2012). Asimismo, el uso de enmiendas con fines forestales, podrían constituir un método efectivo para favorecer el proceso de restauración natural en ecosistemas degradados.

Se ha demostrado para zonas agrícolas, que la aplicación de “mulching” de residuos orgánicos resulta efectiva como medida de control de la erosión, a la vez que favorece el desarrollo de la cubierta vegetal (Jordan et al., 2010). Además, Mulumba (2008) demostró un efecto positivo en la porosidad de los suelos tras su aplicación. Otros estudios muestran cómo tras la aplicación de la enmienda se produce una estabilización de los macroagregados del suelo, que se justifica por el incremento en el contenido de materia orgánica tras el proceso de humificación de la enmienda (Benedicto-Valdés et al., 2005). Del mismo modo, los “mulch” contribuyen a reducir el efecto splash durante los aguaceros (Ferrerías et al., 2006). La adición de esta enmienda sobre la superficie del suelo, se asocia con un aumento la rugosidad superficial lo que disminuirá la velocidad del flujo, favoreciendo todos los procesos de infiltración (Jordan et al., 2010). Asimismo, Adekalu et al. (2007) probaron que la evapotranspiración se reducía en aquellos suelos que fueron cubiertos por la enmienda.

Otro tipo de residuos orgánicos también han sido objeto de estudio. Ojeda (2003) demostró un descenso en la escorrentía de un 32 por ciento cuando los lodos de depuradora eran aplicados a un suelo agrícola. Por

otro lado, diferentes estudios han probado como añadiendo al suelo un compuesto de yesos con poliacrilamida (PAM) se podía prevenir el sellado superficial del mismo. Además contribuían a reducir la escorrentía. Abrol et al. (2003) demostraron que la adición de polímeros hidroabsorbentes conseguía reducir las pérdidas de suelo, aunque manifestaron que este efecto se hacía más débil a medida que la intensidad de precipitación aumentaba. Se pone así de manifiesto la efectividad de los mulch, lodos y polímeros como medidas de control de la erosión y escorrentía. Sin embargo, no existen muchos estudios comparativos bajo la misma condición climática y con un fin forestal. Los objetivos específicos a discutir en esta investigación pasan por: 1) analizar el perfil de humedad del suelo bajo los diferentes manejos; 2) determinar los mecanismos de escorrentía superficial en suelos forestales mediterráneos y, evaluar si las enmiendas incluían alguna modificación en los mismos; y 3) determinar la producción de sedimentos en suelos reforestados y enmendados.

## 2. ÁREA DE ESTUDIO

El área experimental El Pinarillo, se encuentra ubicada a 470 m.s.n.m. en la parte alta de un abanico aluvial (conglomerados calcáreos) dentro del Parque Natural Sierra Tejeda, Almirajara y Alhama, al sur de España. El clima es seco mediterráneo (temperatura media de 18°C, precipitación media 589 mm año<sup>-1</sup>). La vegetación consiste en un bosque de pino abierto con el típico matorral mediterráneo. Las parcelas se encuentran ubicadas en una zona agrícola abandonada en los años 1950 y recolonizada por matorral y herbáceas. En el área experimental los suelos son de tipo Leptosoles líticos y eútricos, resultado de una elevada fracturación en la roca madre (LUCDEME, 1986). En general, los cuatro perfiles abiertos en el área experimental (noviembre del año 2010) para la caracterización de los mismos, nos muestran suelos de escasa potencia, donde la profundidad oscila entre 35 y 50 cm. Su perfil más característico es ACK/Bw, con bajo contenido en materia orgánica, parcialmente humificada. Los suelos presentan textura franco-arenosa, sin plasticidad o adherencia y con un elevado contenido en gravas (>50%).

**Tabla 1.** Caracterización inicial de los suelos en el área de estudio. Muestreo correspondiente al mes de Octubre del año 2010.

<i>Propiedad edáfica</i>		<i>Hor A</i>	<i>Hor Ck</i>
<i>Gravas</i>	(%)	56,0	53,0
<i>Arenas</i>	(%)	60,0	54,0
<i>Limos</i>	(%)	32,0	34,0
<i>Arcillas</i>	(%)	8,0	12,0
<i>Textura</i>		Franco-Arenosa	Franco-Arenosa
<i>SWC: Capacidad de campo</i>	(%)	25,2	--
<i>SWC: Punto de marchitez</i>	(%)	6,4	--
<i>SWC: Agua útil</i>	(%)	18,8	--
<i>Estabilidad de agregados</i>	(%)	51,0	14,0
<i>Capacidad de intercambio catiónico</i>	meq 100 g <sup>-1</sup>	120,4	151,2
<i>Carbono total</i>	(%)	12,5	12,4
<i>Nitrógeno total</i>	(%)	0,2	0,2
<i>Carbono/Nitrógeno</i>		74,0	83,0
<i>Carbono orgánico</i>	(%)	1,9	1,5
<i>pH</i>		8,0	8,3
<i>Conductividad eléctrica</i>	(μS cm <sup>-1</sup> )	501,0	598,0

## 3. MATERIALES Y MÉTODOS

### 3.1. Parcelas y enmiendas

El área experimental incluye cinco conjuntos de parcelas experimentales (24 m<sup>2</sup> = 2 m ancho x 12 m de largo; pendiente: 7.5%; orientación: N170°). Cada parcela tiene una réplica y están conectadas a un depósito

(250 l) para la medida de la escorrentía y erosión. Además, en el área experimental se ha instalado una estación meteorológica para la medida de la precipitación y 96 sondas de humedad a tres profundidades diferentes del perfil del suelo (5, 10 y 25 cm). El periodo de estudio fue de veintiséis meses (Nov-2011 a Ene-2014). Previamente, la vegetación inicial fue eliminada con el fin de homogenizar las condiciones de partida. Diferentes tratamientos de manejo del suelo basados en la adición de enmiendas, fueron aplicados en Mayo 2011. Cuatro enmiendas fueron añadidas al suelo (dosis de 10 Mg ha<sup>-1</sup>): i) mulch de paja (SM); ii) mulch de restos de poda (*Pinus halepensis* L.) (PM); iii) polímeros hidroabsorbentes (Terracottem) (HP); iv) lodos de depuradora (RU).

### 3.2. Reforestación

Seis meses después de la adición de enmiendas al suelo, Noviembre 2011; las parcelas fueron reforestadas siguiendo el mismo patrón espacial (Fig. 3). Las especies usadas fueron: *Chamaerops humilis* L., *Lavandula stoechas* Lam., *Lavandula dentatae* L., *Lavandula multifida* L., *Rhamnus alaternus* L., *Rhamnus oleoides* L., *Pistacea lentiscus* L., *Rosmarinus officinalis* L. and *Thymus capitatus* L. Durante el proceso de reforestación el suelo fue volteado afectando a los primeros 25 cm. El control (C) fue seleccionado usando dos parcelas volteadas y reforestadas, pero no enmendadas.

## 4. RESULTADOS

A continuación se exponen los resultados de humedad del suelo ante los diferentes eventos de precipitación analizados para el periodo comprendido entre las fechas Noviembre del año 2011 a Enero del año 2014. Del mismo modo se muestran los datos de escorrentía y erosión obtenidos en cada tratamiento para el mismo periodo de estudio.

### 4.1. Humedad del suelo

Para el análisis de los resultados, hemos agrupado los eventos de precipitación que habían generado escorrentía superficial en tres clases. Las clases se han definido en función de los percentiles P<sub>75</sub>, P<sub>50</sub> y P<sub>25</sub>, y estos, se han definido atendiendo al volumen de precipitación acaecida (mm). Así, (i) P<sub>75</sub> define aquellos eventos de precipitación cuyo volumen fue  $\geq 61,4$  mm; (ii) P<sub>50</sub> envuelve aquellos eventos de precipitación con una cantidad  $< 61,4$  mm y  $\geq 27,9$  mm; (iii) P<sub>25</sub> define aquellos eventos de precipitación con cantidades  $< 27,9$  mm. Del mismo modo para cada clase, se han seleccionado de forma aleatoria dos eventos de escorrentía y se ha controlado la humedad del suelo a tres profundidades diferentes del perfil (5, 10 y 25 cm.).

De este modo, los valores medios de humedad en el perfil para las 12 parcelas, están representados en la figura 4. El porcentaje de humedad en cada profundidad, se ha calculado usando la media de los valores del contenido volumétrico en agua, registrados cada 15 minutos, en el intervalo comprendido entre la primera y la última gota registrada durante el evento lluvioso.

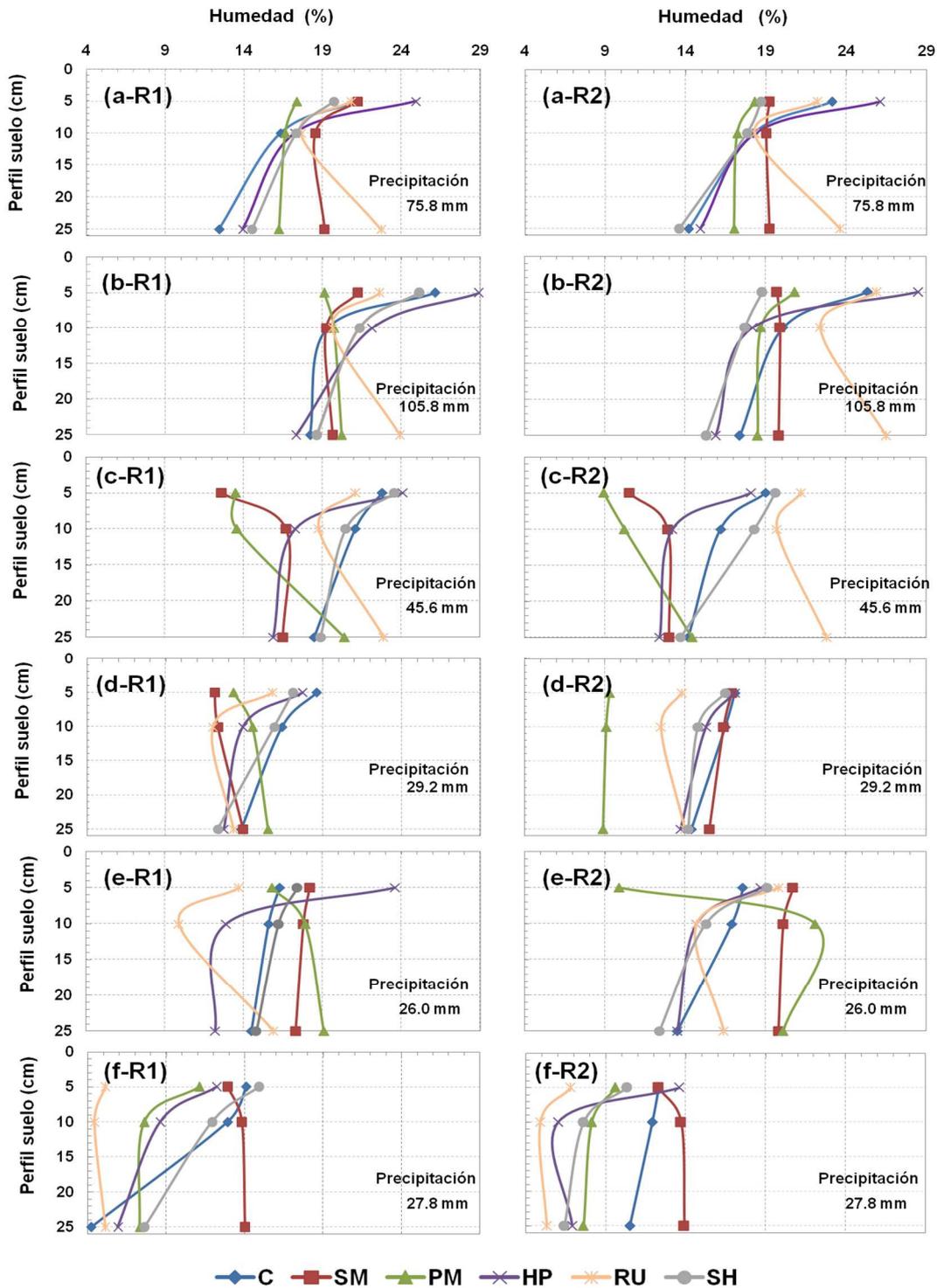
#### 4.1.1. Variabilidad de la humedad del suelo durante eventos de precipitación de magnitud extrema

Los eventos de precipitación de gran volumen se corresponden con las fechas 7/nov/2012 (volumen de precipitación: 75,8 mm; duración del evento: 44,25 horas; I<sub>15</sub>: 8,8 mm h<sup>-1</sup>) y 18/nov/2012 (volumen de precipitación: 105,8 mm; duración del evento: 14,7 horas; I<sub>15</sub>: 52,8 mm h<sup>-1</sup>).

En ambos eventos, para los conjuntos control, polímeros y estiércol, los mayores valores de humedad se encontraron próximos a la superficie (a 5 cm. de profundidad) (Fig. 1.a-R1/R2 y Fig. 1.b-R1/R2). Cuando se analizaban los valores a 10 cm. de profundidad, la humedad decrecía o se mantenía más o menos constante en los seis tratamientos. Sin embargo, a la profundidad entre 10 cm. y 25 cm. la tendencia registrada entre los conjuntos control, polímeros y estiércol fue diferente a la registrada en los suelos enmendados con paja, poda y lodos. En las parcelas control, polímeros y estiércol, la humedad continuaba decreciendo mientras que en los conjuntos paja, poda y lodos, la humedad se mantenía más o menos constante o incrementaba. Este aumento en profundidad, fue especialmente significativo en aquellas parcelas enmendadas con lodos de depuradora.

**Figura. 2.** Valores de humedad del suelo en el perfil. (a), evento de precipitación del 7 de noviembre de 2012 (volumen: 75.8 mm; duración: 44.25 horas; I<sub>15</sub>: 8.8.mm h<sup>-1</sup>). (b), evento de precipitación del 18 de noviembre de 2012 (volumen: 105.8 mm; duración: 14.7 horas; I<sub>15</sub>: 52.8.mm h<sup>-1</sup>). (c), evento de precipitación del 29 de agosto de 2013 (volumen: 45.6 mm; duración: 3.5 horas; I<sub>15</sub>: 63.2 mm h<sup>-1</sup>). (d), evento de precipitación del 19 de enero de 2013 (volumen: 29.2 mm; duración: 6.5 horas; I<sub>15</sub>: 42.4 mm h<sup>-1</sup>). (e), evento de precipitación del 5 de abril de 2013 (volumen: 26.0

mm; duración: 9.8 horas;  $I_{15}$ : 25.5 mm h<sup>-1</sup>). (f), evento de precipitación del 23 de febrero de 2013 (volumen: 27.8 mm; duración: 17.8 horas;  $I_{15}$ : 14.3 mm h<sup>-1</sup>). (R1), réplica 1. (R2), réplica 2. Donde; C, control; SM, mulch de paja; PM, mulch de astillas de pino; RU, lodos de depuradora; SH, estiércol de origen vacuno; HP, polímeros hidroabsorbentes.



#### 4.1.2. Variabilidad de la humedad del suelo durante eventos de precipitación de magnitud media

Los eventos de volumen medio, se correspondían con las fechas 29/ago/2013 (volumen de precipitación: 45,5 mm; duración del evento: 3,5 horas;  $I_{15}$ : 63,2 mm h<sup>-1</sup>) y 19/ene/2013 (volumen de precipitación: 29,2 mm; duración del evento: 6,5 horas;  $I_{15}$ : 42,4 mm h<sup>-1</sup>).

Para estos dos eventos (Fig. 1.c-R1/R2 y Fig. 1.d-R1/R2), los cambios en el contenido de humedad a lo largo del perfil, fueron menos significativos que en los eventos de gran volumen. Sin embargo, también se han encontrado diferencias entre las tendencias para los tratamientos control, estiércol y polímeros y las parcelas enmendadas con paja, poda y lodos. En los conjuntos, polímeros y estiércol, la tendencia general de los valores de humedad fue a decrecer a lo largo del perfil, mientras que en las parcelas enmendadas con paja, poda y lodos, la humedad se mantenía más o menos constante o incrementaba. Este patrón se repetía siempre, excepto en las parcelas tratadas con lodos, donde se registraba un descenso en la humedad únicamente en el intervalo de profundidad entre 5 cm. y 10 cm.

#### *4.1.3. Variabilidad de la humedad del suelo durante eventos de precipitación de magnitud baja*

Los eventos de precipitación de pequeño volumen se corresponden con las fechas 5/abr/2013 (volumen de precipitación: 26,0 mm; duración del evento: 9,8 horas;  $I_{15}$ : 25,6 mm h<sup>-1</sup>) y 23/feb/2013 (volumen de precipitación: 27,8 mm; duración del evento: 17,8 horas;  $I_{15}$ : 14,3 mm h<sup>-1</sup>).

A las profundidades entre 5 cm. y 10 cm., la humedad del suelo decrecía en los tratamientos control, estiércol, polímeros y lodos (Fig. 1.e-R1/R2 y Fig. 1.f-R1/R2). Sin embargo, a las profundidades comprendidas entre los 10 cm y los 25 cm., la tendencia era diferente entre las parcelas control, estiércol y polímeros y en los suelos tratados con lodos. Por un lado en los conjuntos control, estiércol y polímeros la humedad decrecía de forma continuada en profundidad. Por el otro, en los suelos enmendados con lodos la humedad incrementaba.

Para el evento de 5/abr/2013, en las parcelas enmendadas con un mulch de paja, la humedad decrecía en aquellas profundidades comprendidas entre los 10 cm. y los 25 cm. (Fig. 1.e-R1/R2). La tendencia fue inversa en los suelos enmendados con un mulch de astillas de poda. Sin embargo, el patrón fue diferente para las profundidades comprendidas ente 10 cm. y 25 cm., donde la humedad incrementaba o se mantenía más o menos constante en ambos tratamientos.

Cuando analizábamos el evento del 23/feb/2013, el patrón superficial se invertía con respecto al modelo descrito para el 5 de Abril del año 2013. En este caso, la humedad incrementaba en las parcelas enmendadas con paja y decrecía en las enmendadas con las astillas de poda (Fig. 1.f-R1/R2). Nuevamente, la tendencia fue diferente para las profundidades comprendidas entre los 10 cm. y los 25 cm., donde la humedad del suelo incrementaba en ambos tratamientos en relación a los contenidos medidos entre las profundidades de 5 a 10 cm.

## **4.2. Escorrentía**

Los resultados que aportamos, para la escorrentía superficial, corresponden a los datos obtenidos a partir de las doce parcelas experimentales entre las fechas 22/nov/2011 y 31/ene/2014. Durante este periodo, se registraron un total de 57 eventos de precipitación, que registraron un total de 1241,5 L. con intensidades medias diarias comprendidas entre 0,7 mm h<sup>-1</sup> y 13,0 mm h<sup>-1</sup>. Sin embargo, no todos los eventos de precipitación habían generado escorrentía. El número de eventos generadores de escorrentía no fue fijo para las doce parcelas, sino que demostró ser variable en función del tratamiento aplicado al suelo. Así, de los 57 eventos de precipitación registrados en el periodo de estudio, únicamente 20 eventos habían generado escorrentía superficial en los conjuntos control, paja y polímeros, 18 eventos habían sido medidos en las parcelas enmendadas con estiércol de origen vacuno y 16 eventos en los conjuntos de poda y lodos (Tabla 2).

Respecto a la cantidad de escorrentía superficial generada, la tabla 2 muestra para los suelos reforestados y no enmendados, una media de  $8,0 \pm 22,0$  L. por evento. Del mismo modo, en los suelos enmendados con polímeros, se había registrado una media similar ( $8,1 \pm 20,1$  L.). Sin embargo, los suelos enmendados con estiércol, habían registrado medias ligeramente inferiores. Específicamente, su valor fue de  $7,0 \pm 19,2$  L. Cuando los suelos fueron tratados con los restantes tratamientos, la media de escorrentía superficial por evento decrecía significativamente. Así, para las enmiendas paja, poda, y lodos, los valores medidos fueron  $2,7 \pm 8,3$  L.;  $1,3 \pm 3,5$  L. y  $2,2 \pm 5,9$  L., respectivamente. Finalmente, para todos los casos, los valores para la

desviación estándar fueron mayores que la media. Esto nos habla de sesgo positivo en los datos, es decir, habían sido los eventos punta los que han condicionado la distribución de los datos.

Relativo a eventos máximos o punta de escorrentía superficial, son los conjuntos paja, poda y lodos aquellos que presentaron los valores más bajos (Tabla 2). Concretamente, estos máximos se asocian al evento de precipitación acaecido el 19/ene/2013 (volumen de precipitación = 19,1 mm;  $I_{15} = 28,8 \text{ mm h}^{-1}$ ). Concretamente, los valores alcanzados fueron 50,0 L.; 56,4 L. y 28,7 L. para los conjuntos paja, poda y lodos, respectivamente. De este modo, este evento había supuesto un 32,3%, 44,5% y 22,4% del total de escorrentía generada en los tratamientos paja, poda y lodos, respectivamente.

**Tabla 2.** Características generales de la escorrentía para los diferentes tratamientos. Donde; C, control; SM; mulch de paja; PM, mulch de astillas de pino; RU, lodos de depuradora; SH, estiércol de origen vacuno; HP, polímeros hidroabsorbentes; N, numero de eventos registrados para el periodo 22 de noviembre del año 2011 hasta 31 de enero del año 2014;  $SD \pm$ , desviación estándar; Max, evento máximo (L).

Tratamiento	N	N eventos	Media(L.)	$SD \pm$	Max(L.)	Acumulado(L.)
C	2	20	8	22	116,7	457,4
SM	2	20	2,7	8,3	50	154,7
PM	2	16	2,1	7,9	54,6	122,7
RU	2	16	2,2	5,9	28,7	128,1
SH	2	18	7	19,3	118,6	404,8
HP	2	20	8,1	20,1	127,8	461,8

### 4.3. Erosión

La media de sedimentos emitidos por evento, fue relativamente alta en los conjuntos control, polímeros y estiércol ( $9,0 \pm 28,4 \text{ Kg.}$ ;  $14,8 \pm 43,4 \text{ Kg.}$  y  $16,0 \pm 51,5 \text{ Kg.}$ , respectivamente). Por otro lado, los conjuntos paja, poda y lodos mostraron valores medios significativamente menores ( $0,4 \pm 1,0 \text{ Kg.}$ ;  $0,2 \pm 0,3 \text{ Kg.}$  y  $0,2 \pm 0,3 \text{ Kg.}$ , respectivamente). En los conjuntos control, estiércol y polímeros, los valores para la desviación estándar, muy superiores al valor medio, nos hablan por tanto, de sesgo positivo en los datos (Tabla 3). Es decir, son los eventos extremos aquellos que condicionan la distribución de los datos. Respecto a los sedimentos acumulados puede observarse una tenencia similar (Tabla 3). La escorrentía superficial y los sedimentos emitidos fueron mucho mayores en los conjuntos control, polímeros y estiércol, cuando se comparaban con los valores registrados en los conjuntos paja, poda y lodos.

**Tabla 3.** Características generales de los sedimentos emitidos (Kg) para los diferentes tratamientos. Donde; C, control; SM; mulch de paja; PM, mulch de astillas de pino; RU, lodos de depuradora; SH, estiércol de origen vacuno; HP, polímeros hidroabsorbentes; N, numero de eventos registrados para el periodo 22 de noviembre del año 2011 hasta 31 de enero del año 2014;  $SD \pm$ , desviación estándar; Max, evento máximo (Kg).

Tratamiento	N	N eventos	sedimentos (Kg)	$SD \pm$	Max(Kg)	Acumulado(Kg)
C	2	20	9	28,4	125,6	179,8
SM	2	19	0,4	1	4,5	7,6
PM	2	16	0,2	0,3	1	3,3
RU	2	16	0,3	0,3	1,3	3,1
SH	2	18	16	51,5	232,3	320,1
HP	2	20	14,7	43,3	187,9	295

En relación a los sedimentos máximos emitidos, fueron los conjuntos paja, poda y lodos aquellos que presentaron los valores más bajos (4,5 Kg., 1,0 Kg. y 1,3 Kg., respectivamente). Concretamente, el máximo para el conjunto enmendado con paja se asociaba con el evento de precipitación del 30/sep/2012 (volumen de precipitación = 103,8 mm;  $I_{15} = 49,8 \text{ mm h}^{-1}$ ). Los máximos para los conjuntos poda y lodos, se registran durante los eventos de precipitación de 29/ago/2013 (volumen de precipitación = 45,6 mm;  $I_{15} = 31,60 \text{ mm h}^{-1}$ ) y 7/sep/2013 (volumen de precipitación = 30,6 mm;  $I_{15} = 12,40 \text{ mm h}^{-1}$ ), respectivamente. Estos máximos, además, habían supuesto un 30,30%; 41,91%; 59,21% de total de sedimentos medidos, en todo el periodo de estudio, para los conjuntos poda, lodos y paja, respectivamente.

El máximo de los máximos de la serie analizada (232,3 Kg.), tuvo lugar el 30/sep/2012, produciendo un 72,57% del total de los sedimentos registrados en el conjunto tratado con estiércol. A este evento de precipitación, también se asocian los máximos encontrado en los conjuntos control y polímeros (Tabla 3). Suponiendo esto, un 69,85% y 63,69% del total de los sedimentos registrados, respectivamente, en ambos tratamientos.

## **5. DISCUSIÓN**

De acuerdo a los resultados, la respuesta hidrológica y erosiva de los seis tratamientos mostro disparidad pese a que la exposición a la lluvia fue la misma. Esto significó que los tratamientos jugaron un papel clave en el contenido de humedad del suelo, y en la producción de escorrentía y sedimentos. En el conjunto control, la escorrentía superficial en respuesta al evento de precipitación fue muy rápida e intensa y, aparecía, inmediatamente después de que las primeras gotas de lluvia comenzasen. Esto, a su vez, afectó a los procesos de erosión. Así, el comportamiento para los sedimentos emitidos mostró la misma tendencia que la descrita para la escorrentía superficial. Al mismo tiempo, si atendíamos a los procesos de humectación en el perfil, los mayores valores de humedad se registraron en la parte alta del suelo, entre los 0-5 cm, mientras que el suelo de debajo, 10-25 cm, se encontraba relativamente seco. En otras palabras, mayores cantidades de de escorrentía superficial se generaron cuando, excepto para la parte alta del suelo, el suelo se encontraba parcialmente seco. Además, cuanto mayor fue la intensidad del evento de precipitación, una respuesta mayor y más marcada aparecía para la escorrentía. De este modo, los eventos de escorrentía de mayor cantidad, solían estar asociados con el final del verano mediterráneo (Ruiz-Sinoga y Romero-Díaz, 2010, Hueso González et al., 2014). Esto significó que en los suelos no enmendados, la generación de escorrentía superficial se produjo por exceso de lluvia (modelo Hortoniano) y no por mecanismos de saturación (Lavee et al., 1998). Horton (1933) estableció que en medios semiáridos la escorrentía superficial es la consecuencia de una intensidad de precipitación superior a la capacidad de infiltración del suelo. La conclusión práctica, es que en áreas forestales donde los suelos no son enmendados, se esperan grandes cantidades de escorrentía superficial y sedimentos (Hueso González et al., 2015).

Nuestros resultados demostraron variabilidad en la respuesta hidrológica y erosiva para los suelos que fueron enmendados con mulch de paja o poda, polímeros, estiércol o lodos. Sorprendentemente, las parcelas enmendadas con paja, poda y lodos, se caracterizaron por una respuesta en la emisión de escorrentía, que fue opuesta a la encontrada en las parcelas estiércol y polímeros. Mientras que en los conjuntos paja, poda y lodos, la escorrentía fue muy inferior a la medida en el control, en las parcelas polímeros y estiércol, fue superior o parecida. Además, describía una tendencia similar. La emisión de sedimentos para los tratamientos paja, poda y lodos fue muy baja, mientras que en los conjuntos polímeros y estiércol, fue superior al control. Con respecto a la redistribución del agua en el perfil del suelo, de forma general, aparecen dos respuestas: (i) los suelos enmendados con paja, poda y lodos mostraron una distribución más o menos uniforme de humedad a lo largo del perfil, y donde para algunos casos, esta aumentó en profundidad; (ii) los conjunto polímeros y estiércol mostraron una distribución no uniforme, similar al control, donde el contenido de humedad decrecía con la profundidad.

En términos generales, las parcelas enmendadas con mulch de paja y poda mostraron un contenido de humedad similar a lo largo del perfil. Sin embargo, cuando el evento de precipitación presentó intensidades bajas, el contenido de humedad incrementaba con la profundidad. Así, los valores fueron mayores a 25cm que en superficie (5 cm). Esta tendencia fue inversa a la descrita en los suelos control, donde la humedad siempre decrecía con la profundidad del perfil. Esto estaba en consonancia con lo descrito para las tasas de infiltración y percolación, que fueron significativamente mayores en los dos conjuntos enmendados con mulch. La explicación estos resultados pasa por las propias características del mulch y, por el método de apli-

cación de los mismos. En mayo del año 2011 las enmiendas paja y poda se aplicaron sobre la superficie de las parcelas a las dosis de  $10 \text{ Mg ha}^{-1}$ , posteriormente en noviembre del mismo año, el suelo se volteo a 25 cm de profundidad. Esto había favorecido la formación de macroporos/grietas a lo largo de todo el perfil del suelo. Estos macroporos son perfectamente reconocibles en la figura 2. Todo ello posibilitó que la escorrentía superficial se generase solamente en los casos en que el suelo estaba saturado o parcialmente saturado. Este modelo de generación de escorrentía por saturación, es típico de ambientes húmedos y subhúmedos, donde los suelos están bien estructurados y cubiertos por una densa capa de vegetación (Lavee et al., 1998; Ward and Robinson, 2000). Desde el punto de vista de la gestión, se traduce en que el uso de las enmiendas mulch de paja y poda, resultan muy efectivas para reducir los mecanismos de generación de escorrentía y consecuentemente, resultan muy útiles para el control de la erosión.

**Figura 2.** Perfiles de suelo para los seis tratamientos aplicados. Donde: SH, estiércol; HP, polímeros hidroabsorbentes; PM, mulch de poda; SM, mulch de paja RU, lodo de depuradora; C, control. En la regla cada cuadrado pequeño representa 1 cm. Fuente: Elaboración propia



Resultados similares a los obtenidos para las enmiendas paja y poda, se observaron en las parcelas enmendadas con lodos (Hueso Gonzalez et al., 2014). La enmienda se aplico en mayo del año 2011 (dosis  $10 \text{ Mg ha}^{-1}$ ) y, la reforestación, con el correspondiente volteo del suelo en profundidad, tuvo lugar en noviembre del año 2011. En estas parcelas, las tasas de infiltración medidas para las succiones representativas a los macroporos fueron significativamente mayores a las encontradas en los suelos no enmendados. Así, el contenido de humedad fue mayor a 25 cm de profundidad que a 5 cm, mientras que los valores más bajos se registraron a la profundidad de 10 cm. Estos resultados se explican por el tipo de cubierta vegetal que se había desarrollado. Las parcelas enmendadas con lodos habían favorecido el crecimiento de una planta herbácea anual, *Carlina hispanica* Lam., que durante todo el periodo de estudio, cubría el 100% de la superficie de la parcela. El sistema radicular de esta planta es rizomatoso (Fig 2), además, se sitúa entre los 1 y los 10 cm de profundidad en el perfil. Un rizoma es un tallo subterráneo con varias yemas que crece de forma horizontal emitiendo raíces y brotes herbáceos de sus nudos. Estos rizomas crecen indefinidamente y, aunque con curso de los años, mueren las partes más viejas, cada año producen nuevos brotes, pudiendo de ese modo cubrir grandes áreas de terreno. El sistema radicular de la *Carlina hispanica* Lam., es extremadamente absorbente y, fue el responsable del decrecimiento en los valores de humedad a 10 cm de profundidad (Wahrmund et al., 2010).

Con respecto a la emisión de escorrentía y sedimentos para las parcelas enmendadas con lodos, nuestros resultados coinciden con lo que otros autores han descrito para suelos agrícolas (Guerrero et al., 2001; Galdos et al., 2004). La escorrentía total se redujo en 72% y los sedimentos acumulados en un 98% cuando se comparaban con los suelos no enmendados. Ruiz-Sinoga et al. (2009) demostraron que las plantas anuales y la vegetación muerta conectada al suelo, actuaban como áreas sumideros donde la infiltración se convertía en el proceso dominante. Así en este conjunto, cuando se produjo una lluvia erosiva, la cobertura vegetal estaba suficientemente desarrollada como para desempeñar su papel protector del suelo. Esto mismo había sido descrito por Sort y Alcañiz (1999). Además, cuando se analizó la superficie de las parcelas enmendadas con lodos, no se observaron evidencias de transporte de sedimentos en el suelo o formación de rill. De este modo,

nuestros resultados demuestran que existen tres factores que podrían estar detrás de los mecanismos de generación de escorrentía y sedimentos para este tratamiento: (i) el efecto protector de la cubierta vegetal, (ii) el efecto directo de los lodos de depuradora y, (iii) el efecto del volteo del terreno. Sin embargo, no nos ha sido posible determinar el peso de cada uno de los componentes en la respuesta hidrológica-erosiva de los suelos enmendados con lodos. En esta línea, Ojeda et al. (2003) mostraron que cuando un suelo agrícola era enmendado con lodos de depuradora a las dosis de 10 Mg ha<sup>-1</sup>, la vegetación desarrollada sobre el mismo, se convertía en el factor principal controlador de la escorrentía. La conclusión práctica es que los lodos han resultado muy efectivos para reducir las tasas de escorrentía y erosión para suelos forestales reforestados. Sin embargo, al contrario que en los conjuntos paja, poda, polímeros, estiércol y control, la aplicación de los lodos había favorecido el desarrollo de una cobertura de plantas herbáceas que dominaba toda la superficie de la parcela.

Una tendencia similar a la descrita para el conjunto control, fue encontrada en los suelos enmendados con estiércol y polímeros. En estas parcelas, con independencia de las características del evento, los mayores contenidos de humedad, estaban asociados con los primeros centímetros del perfil (0-5 cm). Sin embargo, se observó un descenso gradual en los valores con la profundidad del perfil (5-25 cm). Es digno de tener en consideración, que los plantones en las parcelas enmendadas con polímeros se reforestaron siguiendo el mismo patrón espacial que para el resto de tratamientos. Sin embargo, los polímeros se introdujeron en el hoyo de plantación a la profundidad de 5-10 cm. El Terracottem es una mezcla bien equilibrada de 23 sustancias diferentes pertenecientes a 6 familias distintas (polímeros hidrófilos, abonos minerales solubles, abonos minerales de cesión lenta, abonos orgánicos, estimuladores de crecimiento y material portador). Este polímero se presenta en forma de mezcla seca y polvorosa. Su densidad equivale a 1.150 Kg m<sup>-3</sup>. Los polímeros incrementaban su volumen durante los eventos de precipitación, pasando del estado sólido a estado gel. Un vez hidratados, detectamos que producían un efecto blindaje o de sellado sobre los primeros 5-10 cm del suelo. Por consiguiente en condiciones de suelo seco, durante el evento de precipitación, mayor cantidad volumen de agua podía ser almacenada en el perfil. Sin embargo, una vez que los polímeros se saturaban, actuaban como una barrera impermeable y el contenido de humedad del suelo decrecía dramáticamente. Este efecto barrera, explicó las altas tasas de erosión y escorrentía registradas para este tratamiento. Desde el punto de vista de la gestión, los polímeros no son recomendables para reducir las pérdidas de suelos después de un proceso de reforestación en condiciones mediterráneas. Bajo estos climas, en la mayoría de los casos, la precipitación ocurre de forma torrencial, lo que favorece la rápida hidratación de los mismos.

## **6. CONCLUSIONES**

- 1) La respuesta del suelo a la lluvia estuvo condicionada por el tipo de manejo que se le aplicó al suelo.
- 2) Los suelos no enmendados que habían generado una cantidad de sedimentos totales al final del periodo de estudio del orden de 95-99% respecto para los suelos enmendados con paja, poda y lodos. Sin embargo, los tratamientos de polímeros o estiércol habían registrado un aumento en la cantidad de sedimentos totales al final del periodo de estudio respecto al control. La respuesta a este hecho hay que buscarla en los mecanismos de generación de escorrentía para cada uno de los manejos.
- 3) En las parcelas lodos, polímeros o control, la respuesta hidrológica del sistema después del evento fue rápida y ha sido explicada mediante los mecanismos de generación de escorrentía Hortoniana. En estos tratamientos la escorrentía superficial fue la consecuencia de una intensidad de precipitación superior a la capacidad de infiltración del suelo.
- 4) Los suelos enmendados con mulch de paja, mulch de astillas de pino o lodos de depuradora, mostraron una distribución más uniforme de humedad a lo largo del perfil, donde en algunos casos, esta aumentó en profundidad. De una forma genérica, el contacto de la enmiendas con el suelo había fomentado la creación de macroporos en el perfil, lo que había favorecido los procesos de infiltración. Esto posibilitó que durante el evento de precipitación el agua pasara al interior del suelo por la acción de las fuerzas de la gravedad y por lo tanto posibilitó que la escorrentía superficial se generase solamente en los casos en que el suelo se encontraba saturado o parcialmente saturado.

## **AGRADECIMIENTOS**

Esta investigación ha sido financiada por la Consejería de Economía, Ciencia y Empresa de la Junta de Andalucía y por el Campus de Excelencia internacional AndalucíaTech. Además ha sido soportada técnicamente por el grupo TRAGSA Málaga.

## **7. BIBLIOGRAFÍA**

- Abrol, V., Shainberg, I., Lado, M., Ben-Hur, M. (2013). "Efficacy of dry granular anionic polyacrylamide (PAM) on infiltration, runoff and erosion". *European Journal of Soil Sciences* 64, 699-705.
- Adekalu KO, Olorunfemi IA, Osunbitan LA. (2007): "Grass mulching effect on infiltration, surface runoff and soil loss of three agricultural soils in Nigeria". *Bioresource Technology* 98, 912-917.
- Benedicto-Valdés, G.S., Hidalgo-Moreno, C., Ordaz-Chaparro, V., Sanchez-Hernandez, R., Palma López, D.J. (2005): "Cambios en las propiedades físicas de un suelo arcilloso por aportes de lombricomposto de cachaza y estiércol". *Revista de la Ciencia y Tecnología de América* 30, 775-779.
- Ferreras, L., Gómez, E., Torresani, S., Firpo, I., Rotondo, R. (2006): "Effect of organic amendments on some physical, chemical and biological properties in a horticultural soil". *Bioresource Technology* 97, 635-640.
- Galdos, M.V., De Maria, I.C., Camargo, O.A., (2004): "Soil chemical properties and corn production in a sewage sludge-amended soil". *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 28, 569-577.
- Guerrero, C., Gómez, I., Moral, R., Mataix-Solera, J., Mataix-Beneyto, J., Hernández, T. (2001): "Reclamation of a burned forest soil with municipal waste compost: macronutrient dynamic and improved vegetation cover recovery". *Bioresource Technology* 76, 221-227.
- Hueso-González, P., Martínez-Murillo, J.F., Ruiz-Sinoga, J.D. (2014). "Impact of organic amendments on forest soil properties under mediterranean climatic conditions". *Land Degradation and Development* 25, 604-612.
- Hueso-González, P., Ruiz-Sinoga, J.D., Martínez-Murillo, J.F., Lavee, H. (2015). "Overland flow mechanisms generation affected by topsoil treatment: application to soil conservation". *Geomorphology* 228, 796-804.
- Jordán, A., Zavala, L.M., Gil, J. (2010): "Effects of mulching on soil physical properties and runoff under semi-arid conditions in southern Spain". *Catena* 81, 77-85.
- Lavee, H., Imeson, A.C., Pariente, S., (1998): "The impact of climate change on geomorphology and desertification along a Mediterranean arid transect". *Land Degradation and Development* 9, 407-422.
- LUCDEME. 1986. "Proyecto LUCDEME. Mapa de suelos 1:100.000. Motril-1055". Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. ICONA. Aguilar, J. (Eds.). Universidad de Granada. Facultad de Ciencia. Departamento de Edafología.
- Mulumba, L.N. y Lal, R. (2008): "Mulching effects on selected soil physical properties". *Soil and Tillage Research* 98, 106-111.
- Ojeda, G., Alcañiz, J.M., Ortiz, O. (2003): "Runoff and losses by erosion in soils amended with sewage sludge". *Land Degradation and Development* 14, 563-573.

- Ruiz Sinoga, J.D., Martínez Murillo, J.F. (2009): “Eco-geomorphological system response variability to the 2004–06 drought along a climatic gradient of the Littoral Betic Range (southern Spain)”. *Geomorphology* 103, 351-362.
- Ruiz-Sinoga, J.D., Romero-Díaz, A. (2010). “Soil degradation factors along a Mediterranean pluviometric gradient in Southern Spain”. *Geomorphology* 118, 359–368.
- Sort, X., Alcañiz, J.M. (1999): “Modification of soil porosity after application of sewage sludge”. *Soil and Tillage Research* 49, 337-345.
- Ward, R.C., Robinson, M., (2000): *Principles of Hydrology*. 4<sup>th</sup> edition, McGraw-Hill, pp 450.
- Wahrmund, U., Hekleau, H., Röser, M., Kästener, A., Vitek, E., Ehrendorfer, F., Bernhard von Hagen, K., (2010): “ A molecular phylogeny reveals frequent changes of growth form in *Carlina* (Asteraceae)”. *International Association for Plant Taxonomy* 59, 367-378.