

## APLICACIÓN DE LLUVIA SIMULADA PARA EL ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO HIDROLÓGICO DE *Retama sphaerocarpa* EN SUELOS FRANCO-ARCILLOSOS DE LA ZONA ESTE DE LA COMUNIDAD DE MADRID

L. JIMÉNEZ, J. RAMÍREZ, S. GARCÍA-ORMAECHEA, M.J. MARQUÉS, P. GARCÍA-ESTRÍNGANA, N. ALONSO, R. BIENES

Instituto Madrileño de Investigación Agraria y Alimentaria (IMIA). Dpto. Desarrollo Rural. Finca "El Encín". Ctra. N-II km 38,2. 28800, Madrid. E-mail: luis.jimenez@imia.madrid.org.

**Abstract.** The hydrological behavior of the *Retama sphaerocarpa* has been studied in the east of Madrid. For it, experiments with rainfall simulator have been carried out with an intensity of 108 mmh<sup>-1</sup> on the study parcels. Based on the obtained results, we can say that the witnesses of the *Retama* favors the infiltration, either in association with the vegetation that grows under their canopy or without her, and that the absence of that herbaceous vegetation causes an increase of the runoff. On the other hand, the curves of variation of the runoff rate are adjusted to the equation developed by Mitscherlich, with a half r of 0,97, for a significance of p <0,001.

**Key words:** erosion, runoff, retama, hydrological behavior, infiltration, simulated rainfall.

**Resumen.** Se ha estudiado el comportamiento hidrológico de la *Retama sphaerocarpa* en la zona Este de la Comunidad de Madrid. Para ello, se han realizado ensayos de lluvia simulada con una intensidad de 108 mmh<sup>-1</sup> sobre las parcelas de estudio. En base a los resultados obtenidos, se puede decir que la presencia de la retama favorece la infiltración, tanto en los ensayos realizados en asociación con la vegetación adventicia que crece bajo de su copa como sin ella, y que la ausencia de esa vegetación herbácea provoca un aumento de la escorrentía. Por otro lado, las curvas de variación de la tasa de escorrentía se ajustan a la ecuación desarrollada por Mitscherlich, con una r media de 0,97, para una significación de p <0,001.

**Palabras clave:** erosión, escorrentía, retama, comportamiento hidrológico, infiltración, lluvia simulada.

### INTRODUCCIÓN

La retama (*Retama sphaerocarpa*) es un arbusto leguminoso autóctono de la Península Ibérica y Norte de África. Su utilización para restauración ha sido recomen-

dada por varios autores (Ruiz, 1996; Valle y Bocio, 1996), porque puede colonizar con éxito ambientes degradados (Pugnaire *et al.*, 1996) y tiene gran capacidad de supervivencia. Es interesante conocer su respuesta hidrológica, ya que influye en diversos fac-

tores como son la erosión (Morgan, 1997) o la disponibilidad de agua en el suelo, entre otros. Para ello se utiliza la simulación de lluvia, que es una técnica muy útil para obtener gran cantidad de datos en poco tiempo, a la hora de comparar tratamientos (Meyer, 1994).

Los objetivos de este estudio consisten en determinar el comportamiento hidrológico de un suelo con retama, su posible relación con la vegetación herbácea que lleva asociada y comprobar el ajuste de la respuesta hidrológica a varios modelos matemáticos.

## MATERIAL Y MÉTODOS

Las parcelas de estudio se encuentran en la Finca de “El Encín” (Alcalá de Henares, Madrid) del Instituto Madrileño de Investigación Agraria y Alimentaria (IMIA). Fisiográficamente, se encuentran en una ladera con 6% de pendiente media y orientación S (Bienes *et al.*, 2001). La situación de las parcelas en la ladera se detalla en la Figura 1. El suelo de la zona es *Typic Calcixerepts*, según la “Soil Taxonomy” (USDA, 2003). Los resultados del análisis físico-químico realizado a un perfil de suelo en el área de estudio se pueden ver en la Tabla 1. El clima de la zona es mediterráneo templado (Elías y Ruiz, 1977), según los datos del observatorio de Alcalá de Henares (La Canaleja).

Las parcelas se encuentran en una zona que fue labrada por última vez hace 5 años. En una parte se plantaron retamas de una savia en 1998 (pies de 6 años, actualmente). En la otra se dejó crecer la vegetación de forma natural sin intervención alguna hasta el presente.

El diseño experimental consiste en:

- Tratamiento RVE: presencia de retama y vegetación herbácea: 3 réplicas.
- Tratamiento R: presencia de retama y sin vegetación herbácea: 3 réplicas (es el resultado de eliminar la vegetación herbácea y hojarasca de RVE).
- Tratamiento VE: solo vegetación herbácea: 3 réplicas.
- Tratamiento SD: suelo sin vegetación herbácea: 3 réplicas (es el resultado de eliminar la vegetación herbácea y hojarasca de VE).

Las parcelas de estudio están delimitadas por unos aros metálicos de 1 m de diámetro y tienen una superficie de 0,79 m<sup>2</sup>.

El simulador de lluvia empleado ha sido desarrollado por los departamentos de Desarrollo Rural e Investigación Agraria del IMIA (Pérez *et al.*, 2003), siendo similar al descrito por Cerdà *et al.*, (1997). Este simulador genera lluvias con una intensidad de 108 mmh<sup>-1</sup>, con un coeficiente de uniformidad del 85,8%.

Se realizó un ensayo de simulación de lluvia en cada réplica de cada tratamiento. Se midió el volumen de escorrentía cada minuto, en cada ensayo.

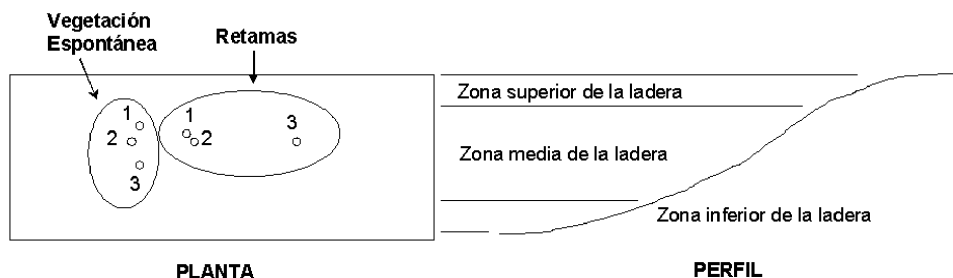


FIGURA 1: Esquema de situación de las parcelas en la ladera.

**TABLA 1:** Análisis físico-químicos del perfil de suelo realizado en el área de estudio.

HOR. FAO	PROF. (cm)	ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO (%)					CLASE TEXT	CALIZA (%)		C.E. (dS m <sup>-1</sup> 25°C)	pH (1:2,5 H <sub>2</sub> O)	M.O. (%)	N org (%)	P (ppm)
		ELEM. GRUESOS	ARENA GRUESA	ARENA FINA	LIMO (ISS)	ARCILLA		TOTAL	ACTIVA					
Ap	0-22	1,9	5,4	39,3	37,6	17,8	F-Ac	12,4	6,4	0,199	8,24	1,11	0,07	8
B1	22-43	9,5	4,6	28,0	50,6	16,9	FAcL	12,8	7,9	0,183	8,40	0,54	0,04	11
C1ca	43-95	20,6	4,0	40,1	29,9	26,1	Aclig	27,2	5,4	0,220	7,96	0,30	0,03	2
C2	95-168	2,2	4,5	36,0	47,6	11,9	F-L	22,8	6,4	2,830	7,92	ip	0,04	3

La cobertura de la vegetación herbácea se determinó mediante el empleo de cuadrats de 20 cm (sin considerar la superficie cubierta por la retama). Se tomaron 5 medidas en cada réplica de cada tratamien-

to. En las parcelas con retama se descartó una medida por la presencia de los troncos de la planta, que distorsionaban el resultado. A su vez se determinó la pedregosidad superficial.

**TABLA 2:** Datos de biomasa, cobertura del suelo, pedregosidad superficial, pendiente y humedad inicial para cada tratamiento y réplica. Los tratamientos son: RVE: presencia de retama con vegetación herbácea, R: presencia de retama sin vegetación herbácea, VE: solo vegetación herbácea y SD: suelo sin vegetación herbácea.

Tratamiento y Réplica	Biomasa			Suelo Cubierto Total (%)	Pedregosidad superficial (%)	Pendiente (°)	Humedad Inicial (%)
	Viva (g)	Hojarasca (g)	Total (g)				
VE1	186,99	175,06	362,05	97,4	0,0	3,3	Húmedo
VE2	215,17	68,06	283,23	96,5	0,0	7,0	Húmedo
VE3	214,33	137,78	352,11	99,0	5,3	2,5	11,9 (Húmedo)
SD1	ip	ip	ip	11,5	11,5	3,3	11,4 (Húmedo)
SD2	ip	ip	ip	1,8	1,8	7,0	9,3 (Húmedo)
SD3	ip	ip	ip	2,4	2,4	2,5	10,0 (Húmedo)
RVE1	212,20	459,67	671,87	99,8	0,6	2,9	Húmedo
RVE2	92,26	391,23	483,49	100,0	0,2	4,6	Húmedo
RVE3	93,76	227,04	320,80	98,4	0,1	1,6	Húmedo
R1	ip	ip	ip	9,5	9,5	2,9	10,8 (Húmedo)
R2	ip	ip	ip	20,0	20,0	4,6	8,9 (Húmedo)
R3	ip	ip	ip	20,9	20,9	1,6	11,9 (Húmedo)

Se determinó la biomasa seca de toda la parcela después de realizar los ensayos en los tratamientos con vegetación herbácea (RVE y VE). Se muestreó por separado la vegetación herbácea viva y la hojarasca. El material se secó a 105° C durante 24 horas.

La humedad del suelo existente antes de realizar cada ensayo se midió por el método gravimétrico.

La pendiente de cada parcela se midió con un perfilador de agujas similar al diseñado por Kuipers (1957).

Los datos de biomasa seca, cobertura del suelo, pedregosidad superficial, pendiente y humedad inicial para cada tratamiento y réplica se detallan en la Tabla 2.

Se ha comprobado el ajuste de los datos obtenidos de variación de la tasa de infiltración con el tiempo a la ecuación propuesta por Green y Ampt (1911), modificada por Mein y Larson (1973), y a la propuesta por Philip (1957), ambas con buenos resultados en el sur de España (todas citadas en Morgan, 1997). También se propone aplicar a la variación de la tasa de escorrentía con el tiempo, la ecuación desarrollada por Mitscherlich (ecuación 1) (Urbano, 1992). El parámetro  $\cdot$  corresponde a la tasa de escorrentía estable.

El parámetro  $\cdot$ , nos da idea de la rapidez con la que se alcanza ese valor estable. Ambos se determinan experimentalmente.

$$TE = \alpha(1 - e^{-\beta t})$$

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los datos relativos al comportamiento hidrológico en cada tratamiento se encuentran en la Tabla 3. Los resultados obtenidos en los ensayos VE1, VE3, SD1, SD3, RVE1 y R1 no se consideran representativos, ya que una vez segada la abundante vegetación herbácea, se observa una microtopografía abrupta, herencia de las labores realizadas en las parcelas, que provoca un encharcamiento y evita la escorrentía. Esto indica la importancia de la microtopografía en los ensayos de lluvia simulada.

Para discriminar el efecto de la vegetación espontánea se compararon los ensayos realizados antes y después de cortar la vegetación herbácea. En las parcelas sin retama (VE y SD), el CE aumentó un 160 % y la TE incrementó en un 163% al cortar la vegetación herbácea. El suelo cubierto total (SCT)

**TABLA 3:** Datos hidrológicos medios para cada tratamiento (media  $\pm$  1 SD; n=1, para VE y SD, y n=2, para RVE y R). Los tratamientos son: RVE: presencia de retama con vegetación herbácea, R: presencia de retama sin vegetación herbácea, VE: solo vegetación herbácea y SD: suelo sin vegetación herbácea. Las variables son: DE (duración del ensayo), IE (tiempo de inicio de la escorrentía), TE (tasa de escorrentía), CE (coeficiente de escorrentía), TI (tasa de infiltración), TEest (tasa de escorrentía estable), TIest (tasa de infiltración estable), tf (tiempo que tarda en cesar la escorrentía desde que cesa la lluvia), vf (volumen de agua recogido desde que cesa la lluvia hasta que se para la escorrentía).

TRATAMIENTOS (3 réplicas)	DE (min)	IE (min s)	TE (mmh <sup>-1</sup> )	CE (%)	TI (mmh <sup>-1</sup> )	TEest (mmh <sup>-1</sup> )	TIest (mmh <sup>-1</sup> )	tf (min s)	vf (ml)
$\overline{VE}$	92	7' 58"	7,0	6,5	101,6	19,0	90,0	1' 31"	149,0
$\overline{SD}$	132	30' 46"	18,4	16,9	90,2	32,0	76,0	1' 44"	205,0
$\overline{RVE}$	60 $\pm$ 0	-	-	-	-	-	-	-	-
$\overline{R}$	104 $\pm$ 49	43' 31" $\pm$ 38'00"	14,4 $\pm$ 2,1	13,2 $\pm$ 1,9	94,2 $\pm$ 2,1	24,0 $\pm$ 2,8	85,0 $\pm$ 2,6	2' 18" $\pm$ 0'20"	212,5 $\pm$ 53,0

para los tratamientos VE y SD fueron del 98 % y del 5 % (n=15), respectivamente. En el tratamiento RVE, los procesos de infiltración tenían una tasa superior a 108 mmh<sup>-1</sup> y no se produjo escorrentía. Por otro lado, en el tratamiento R se generó una TE de 14,4 mmh<sup>-1</sup> con un CE del 13,2 %. El SCT para los tratamientos RVE y R fueron del 99 % y del 17 % (n=12), respectivamente. Por lo tanto, la presencia de vegetación herbácea condicionó de forma determinante la generación de escorrentía. Estos resultados concuerdan con los de Evans (1980), el cual encontró que, cuando el porcentaje de suelo cubierto era superior al 70%, la infiltración se veía muy favorecida en comparación con el suelo desnudo.

Para ver la influencia de la retama junto con su vegetación espontánea asociada se compararon los tratamientos RVE con VE. Se observó que en RVE no se produjo escorrentía, mientras que en VE la TE fue de 7 mmh<sup>-1</sup>. El SCT para los dos casos fue muy similar (98 y 99%). Sin embargo, la biomasa total de vegetación herbácea muestreada en RVE fue sensiblemente mayor que en VE (492,1 y 332,5 g, respectivamente), aunque no hubo diferencias significativas entre los

dos grupos. Por otro lado, también la cantidad de hojarasca en RVE (359,3 g) fue mayor que VE (127,0 g); para estos dos grupos se encontraron diferencias significativas para p<0,05, según el test de Kruskal-Wallis. Otros autores (Moro *et al.*, 1997), también encontraron diferencias significativas entre la cantidad de hojarasca muestreada debajo de la copa de la retama y fuera de ella.

Para determinar en qué medida la retama por sí sola influye sobre la infiltración, se compararon los ensayos realizados con y sin dicho arbusto, pero en ambos casos sin vegetación espontánea (tratamientos R y SD). El CE y la TE obtenidos en SD (16,9 % y 18,4 mmh<sup>-1</sup>, respectivamente) fueron mayores que los obtenidos en R (13,2 % y 14,4 mmh<sup>-1</sup>, respectivamente), lo que supuso un incremento del 28 %, para ambos parámetros.

Los datos observados experimentalmente en la curva de variación de la infiltración con el tiempo frente a los esperados con la ecuación propuesta por Philip en todos los tratamientos, tienen valores de r entre 0,596 y 0,791, para una p<0,001 (Tabla 4). Sin embargo, la ecuación propuesta no explica adecuadamente los datos

**TABLA 4:** Datos de ajuste a las ecuaciones de infiltración y escorrentía. Los datos corresponden a los ensayos: R2 y R3: presencia de retama sin vegetación herbácea (réplicas 2 y 3), VE2: solo vegetación herbácea (réplica 2) y SD2: suelo sin vegetación herbácea (réplica 2). El ajuste de los diferentes modelos a los datos experimentales obtenidos viene determinado por: NS: no significativo; \* significativo p<0,05; \*\* significativo p<0,01; \*\*\* significativo p<0,001.

Ensayo	INFILTRACIÓN					ESCORRENTÍA		
	r ajuste Green y Ampt	r ajuste Philip	Ttest experim (mmh <sup>-1</sup> )	Ttest Green y Ampt (mmh <sup>-1</sup> )	Ttest Philip (mmh <sup>-1</sup> )	r ajuste Mitscherlich	TEest experim (mmh <sup>-1</sup> )	TEest Mitscherlich (mmh <sup>-1</sup> )
VE2	0,394***	0,596***	90,0	100,5	96,6	0,915***	19,0	685,7
SD2	0,508***	0,734***	76,0	88,0	80,2	0,988***	32,0	65,5
R2	0,547***	0,740***	87,0	94,0	88,9	0,978***	22,0	40,5
R3	0,609***	0,791***	83,0	90,1	82,9	0,987***	26,0	43,3

obtenidos experimentalmente. Para los datos esperados con la ecuación propuesta por Green y Ampt con respecto a los datos observados experimentalmente, las  $r$  de ajuste son menores (entre 0,394 y 0,609 según los tratamientos, pero en todos los casos con una significación de  $p < 0,001$ ). El ajuste inadecuado de los datos experimentales obtenidos a estos dos modelos matemáticos puede ser debido a la duración de los ensayos. Sin embargo, el suelo en el que se trabaja tiene un drenaje bueno y ausencia de costras superficiales. En estos casos, alcanzar la TTest es difícil y se necesita mucho tiempo. Al trabajar con simulación de lluvia el gasto de agua es muy grande por lo que la disponibilidad de agua es un factor que limita la realización de ensayos de larga duración (Meyer, 1994). La TTest más parecida a los datos obtenidos experimentalmente se obtiene con la ecuación de Philip, aunque aplicando dicha ecuación se tardaría mucho tiempo en alcanzar esa TTest (Fig. 1).

En cuanto a la curva de variación de la escorrentía (Fig. 1), los datos observados experimentalmente se ajustan a los datos esperados con la ecuación de Mitscherlich con  $r$  entre 0,915 y 0,988 (según los tratamientos), para una significación de  $p < 0,001$  (Tabla 4). Esta ecuación sobreestima el valor de la TEest.

## CONCLUSIONES

La microtopografía de la parcela de estudio puede impedir la generación de escorrentía durante una simulación de lluvia, aun para intensidades de lluvia altas como la ensayada.

La presencia de retama potencia sensiblemente el desarrollo de la vegetación herbácea y mejora la capacidad de infiltración de un suelo, ya sea en asociación con la vegetación herbácea o sin ella.

La pérdida de la parte aérea de la vegetación herbácea provoca un aumento de la

escorrentía. Este incremento es sensiblemente mayor en las parcelas sin retama que en las que la conservaron.

Los datos de variación de la tasa de infiltración con el tiempo no se ajustan bien ni a la ecuación de Green y Ampt ni a la de Philip. Los datos de variación de la tasa de escorrentía con el tiempo se ajustan a la ecuación de Mitscherlich con una  $r$  media de 0,97, para una significación con  $p < 0,001$ . Sin embargo, sobreestima la tasa de escorrentía estable, en comparación con la obtenida experimentalmente.

## AGRADECIMIENTOS

Este estudio ha sido realizado gracias a una beca predoctoral otorgada por el IMIA cofinanciada por el FSE y al proyecto SC98-022-C3 financiado por el INIA y fondos FEDER.

## REFERENCIAS

- Bienes, R., Guerrero-Campo, J., Aroca, J.A., Gómez, B., Nicolau, J.M., Espigares, T. (2001): Evolución del coeficiente de escorrentía en campos agrícolas del centro de España con diferentes usos del suelo. *Ecología*, 15: 23-26.
- Cerdà, A., Ibáñez, S., Calvo, A. (1997): Design and operation of a small and portable rainfall simulator for rugged terrain. *Soil Technology*, 11: 163-170.
- Elías, F. y Ruiz, L. (1977): Agroclimatología de España. INIA-MAPA, de, Madrid, 564 pp.
- Evans, R. (1980): Mecanismos de la erosión hídrica y sus controles espaciales y temporales: un punto de vista empírico. En: *Erosión de suelos*. M.J. Kirkby and R.P.C. Morgan, de. John Wiley & Sons Ltd, 141-163.
- Kuipers H. (1957). A reliefmeter for soil cultivation studies. *Neth. J. of Agric. Sci.*, 255-262.

- Lázaro, F., Elías, F., Nieves, M. (1978): Regímenes de humedad de los suelos de la España peninsular. INIA-MAPA, de, Madrid, 25 pp.
- Meyer, L.D. (1994): Rainfall simulators for soil erosion research. En: *Soil erosion research methods*. R. Lal, de. Soil and Water Conservation Society, 83-103.
- Morgan, R.P.C. (1997): Erosión y conservación del suelo. Mundi-Prensa, de, 343 pp.
- Moro, M.J., Pugnaire, F.I., Haase, P., Puigdefábregas, J. (1997): Effect of the Canopy of *Retama sphaerocarpa* on its understorey in a semiarid environment. *Functional Ecology*, 11: 425-431.
- Pérez, R., Jiménez, L., García-Estríngana, P., Chicharro, M., González, S.; Alegre, J., Bienes, R. (2003): Estudio de las características de un simulador de lluvia. En: *Control de Erosión y Degradación de Suelo*. R. Bienes y M.J. Marqués, de. Forum Calidad, 547-552.
- Pugnaire, F.I., Haase, P., Puigdefábregas, J. (1996): Facilitation between higher plant species in a semiarid environment. *Ecology*, 77: 1420-1426.
- Ruiz, J. (1996): Manual de la flora para la restauración de áreas críticas y diversificación en masas forestales. Consejería de Medio Ambiente, Junta de Andalucía, de, 208 pp.
- Valle, F. y Bocio, I. (1996): Restauración de la vegetación en el sureste de la Península Ibérica. *Cuadernos de la SECF*, 3: 109-122.
- Urbano, P. (1992): Tratado de fitotecnia general. Mundi-Prensa, Madrid, 895 pp.
- USDA. (2003): Key to Soil Taxonomy. 9th Ed. Soil Survey Staff. NRCS. Handbook 436, Washington, USA, 332 pp.