

## **MOVILIZACION DEL SUELO POR IMPACTO DE LAS GOTAS DE LLUVIA: ENSAYO DE UN NUEVO DISEÑO DE CAPSULAS PARA SU DETERMINACION EN PENDIENTES**

M.J. MOLINA & J.V. LLINARES

Centro de Estudios sobre Desertificación (C.S.I.C.-Univ.València-Gen. Valenciana).  
Apartado Oficial 46470-Albal (Valencia)

**Resumen.** El instrumento convencional de medida de las tasas de splash en condiciones de campo, plantea dos problemas fundamentales en áreas forestales mediterráneas cuando la lluvia es intensa, la pendiente elevada y el suelo está desprovisto de vegetación. Su instalación perturba la estructura original del suelo y aumenta la variabilidad, y su escasa elevación sobre la superficie del suelo facilita, no sólo la entrada del suelo movilizado por impacto de la gota de lluvia, sino también parte de los sedimentos arrastrados por la escorrentía generada en la parte superior de la ladera.

Para determinar las tasas de movilización de suelo por impacto de la gota de lluvia en estas áreas se ha diseñado un instrumento de medida modificando la forma de las cápsulas de splash tradicionales, su tamaño y su elevación sobre la superficie del suelo. Asimismo, se ha diseñado un experimento de campo en el que se comparan los resultados obtenidos usando estas nuevas cápsulas con los obtenidos a partir de las cápsulas de medida tradicionales.

Los primeros resultados indican que su instalación no perturba la estructura del suelo y que, en lluvias erosivas, las nuevas cápsulas de 8.5 cm de diámetro elevadas a 1.5 cm sobre la superficie del suelo son más efectivas que las cápsulas tradicionales evitando la entrada de sedimentos movilizados por escorrentía.

Las tasas de splash obtenidas con las cápsulas de 8.5 cm de diámetro son inferiores a las obtenidas con las de 5 cm, por lo que se han de corregir en función del diámetro (Poesen & Torri, 1988) y de la forma de la cápsula. Se ha obtenido una correlación lineal significativa entre las tasas de splash determinadas mediante ambos tipos de cápsulas, lo que permite corregir la subestimación de las tasas de splash debidas a la nueva forma del instrumento de medida.

Para las cápsulas de 8.5 cm, las tasas de splash decrecen linealmente con la elevación sobre la superficie del suelo. Las relaciones lineales obtenidas son específicas para cada evento y dependen de la intensidad de la lluvia y del contenido de humedad del suelo. Dichas relaciones permiten determinar las tasas de splash reales para intensidades de lluvia y estado de humedad del suelo similares a las del estudio.

Las tasas de splash obtenidas tras las correcciones con el diámetro, la altura y la forma de la cápsula varían entre 0.096 g/cm<sup>2</sup> para una intensidad de 16 mm/h y suelo seco y 0.31 g/cm<sup>2</sup> para una intensidad de 53 mm/h y suelo húmedo. Sin embargo, se requiere un rango de condiciones experimentales más amplio para determinar la influencia en las tasas de splash de cada uno de estos dos parámetros.

Mediante las correcciones del diámetro, de la forma y de la altura de colocación de las nuevas cápsulas se estandarizan los resultados, lo que permite comparar éstos con los obtenidos para el mismo suelo en distinto grado de degradación o con los obtenidos para otros suelos mediante las cápsulas de splash tradicionales.

**Palabras clave:** erosión, salpicadura, instrumento de medida, laderas escarpadas.

**Abstract.** Conventional splash cups for the measurement of soil splash detachment in Mediterranean forest soils are not appropriate specially in intense rainfall events, high slope angles and bare soils. Installation of conventional splash cups alters the original soil structure. Besides, a few mm protruding rim above the soil surface not only allows to collect the detached sediment but also allows surface runoff entering the cup.

A new splash cup, which enables us to solve the above problems, has been designed through the modification of the shape, the dimensions and the elevation above the soil surface of the conventional cups. Field experiments enabled us to compare splash rates obtained by conventional splash cups with those obtained by the designed cup.

First results indicate that the alteration of soil structure caused by the installation of the new cups is minimal. The new cups, installed 1.5 cm above the soil surface, prevent runoff erosion entering the cup in intense erosive rainfall events.

Splash rates measured with the new 8.5 cm diameter cups are lower than those obtained with the conventional 5 cm diameter cups, despite of correcting understimation due to the cup dimensions (Poesen & Torri, 1988). This understimation is due to the different shape of the cups. A significant linear correlation between the splash rates obtained experimentally for the two types of cups enables us to correct it.

Splash rates obtained for the new cups decrease linearly with the elevation of cups above the soil surface. This linear relationship is surface state and rain intensity-specific and depend on the rainfall intensity and on the initial moisture content of soil. The linear relationships obtained enable us to correct understimation due to the elevation of cups for the specific conditions of the experiment.

Splash rates obtained after corrections for diameter, shape and elevation vary between 0.096 g/cm<sup>2</sup> for a 16 mm/h rainfall intensity and dry soil to 0.31 g/cm<sup>2</sup> for a 53 mm/h rainfall intensity and wet soil. Nevertheless, a wider range of experimental conditions is needed to determine the influence of these two parameters in the splash rates.

Through the corrections for diameter, shape and elevation of the new cups the results are standardized, which enables comparisons between the obtained results and those obtained for the same soil in different degree of degradation, or to those obtained with the traditional cups for other soils.

**Key words.** soil erosion, splash detachment, splash cups, hillslopes.

## 1. Introducción

La medida de la cantidad de suelo movilizado por impacto de las gotas de lluvia en laderas escarpadas es complicada, puesto que a la gran variabilidad espacial de las propiedades edáficas se añade la variabilidad entre episodios de lluvia y la interferencia de otros procesos de ladera. El instrumento convencional de medida de las tasas de splash en condiciones de campo, plantea dos problemas fundamentales en estas áreas: su instalación, que perturba la estructura original del suelo y aumenta la variabilidad, y su escasa elevación sobre la superficie del suelo que facilita, no sólo la entrada del suelo movilizado por impacto de la gota de lluvia, sino también parte de los sedimentos arrastrados por la escorrentía generada en la parte superior de la ladera cuando la lluvia es intensa, la pendiente elevada y el suelo está desprovisto de vegetación.

Conocer la masa de sedimento movilizado por efecto del impacto de la gota de lluvia en suelos forestales afectados por incendios es importante porque permite determinar los cambios en la erosionabilidad del suelo introducidos por la elevación de la temperatura (modificación de la agregación, combustión de la materia orgánica, elevación del pH etc.) así como los efectos de la desaparición de la cubierta vegetal.

La susceptibilidad del suelo al impacto de la gota de lluvia se mide generalmente mediante cápsulas que recogen en su interior el sedimento movilizado a su alrededor. Estas cápsulas, que suelen ser circulares, se introducen en el suelo casi a ras de la superficie, dejando unos pocos milímetros de elevación sobre ella, para evitar que los sedimentos transportados por el agua de escorrentía entren en su interior. El sedimento movilizado por unidad de superficie se expresa en g/cm<sup>2</sup>, dividiendo la masa de sedimento recogido por la superficie de la cápsula. Entre los primeros investigadores que usaron esta técnica, Bollinne (1975) y Morgan (1978) observaron que el tamaño de la cápsula influía negativamente en la determinación de las tasas de splash. Savat & Poesen (1981) y Torri et al., (1987) han demostrado que para una misma distancia de salpicadura, la tasa de splash medida con estas cápsulas siempre se subestima, y que esta subestimación aumenta con el diámetro de la cápsula. Poesen & Torri (1988) obtuvieron experimentalmente una ecuación de tipo exponencial decreciente para corregir dicha subestimación en

función del tamaño de la cápsula y de esta manera estandarizar los resultados obtenidos con otras cápsulas y poder compararlos entre sí. En teoría, cuanto menor es el tamaño de la cápsula, menor error en la medida real de la tasa de splash. En la práctica, los autores recomiendan tamaños próximos a 10 cm de diámetro, ya que a mayor diámetro menor riesgo de entrada de los sedimentos arrastrados por el agua de escorrentía, puesto que el sedimento, frenado por el borde de la cápsula que sobresale sobre la superficie, se distribuye en una superficie mayor.

El objetivo de este trabajo es diseñar un tipo de cápsula que pueda adaptarse a este tipo de laderas, resolviendo los problemas que plantea la determinación de las tasas de splash en las habituales condiciones de campo. Se pretende conseguir este objetivo mediante la modificación de la forma de las cápsulas de splash tradicionales, su tamaño y su elevación sobre la superficie del suelo. Para comprobar su utilidad, se ha diseñado un experimento de campo en el que se comparan los resultados obtenidos usando estas nuevas cápsulas con los obtenidos a partir de las cápsulas de medida tradicionales.

Los resultados que se presentan en este trabajo corresponden a los ensayos preliminares realizados en el marco de un objetivo más amplio, que es el de determinar si la intensidad del fuego (medida experimentalmente) afecta a la erosionabilidad del suelo. Como medida de erosionabilidad se ha elegido la susceptibilidad del suelo al impacto de la gota de lluvia (tasa de splash).

## 2. Material y métodos

El instrumento de medida diseñado (Fig. 1a) consiste en cilindros huecos de PVC de 9 cm de diámetro externo y 1 cm de altura, cerrados en su parte inferior con una malla de fibra de vidrio de 1 mm de luz. Sobre esta malla se colocan dos papeles de filtro circulares y, sobre ellos, otro círculo de fibra de vidrio de 0.5 mm de luz. Estas tres piezas se sujetan entre sí y al resto de la cápsula, mediante un aro de PVC que se coloca a presión en el interior de la cápsula. El diámetro interior efectivo de la cápsula es de 8.5 cm. La cápsula se sujeta al suelo mediante una varilla de madera de 7mm de diámetro y 10 cm de longitud. El extremo superior de la varilla se enrasa con el borde superior de la cápsula y se sujeta fuertemente a ella, en su parte externa, con pegamento resistente y clavos acerados. El extremo inferior de la varilla de madera es afilado, lo que facilita el anclaje de la cápsula en el suelo. En la Fig. 1b se presenta un esquema de las cápsulas de splash tradicionales que han sido usadas para la comparación de resultados.

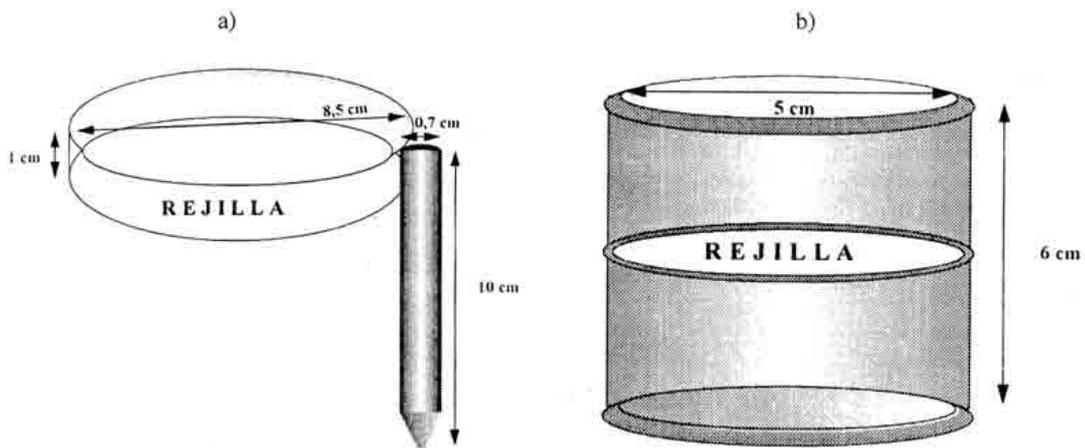


Fig. 1. Esquema de los instrumentos de medida de splash utilizados (a) cápsulas de splash diseñadas en el experimento; (b) cápsulas de splash tradicionales. *Diagram of the instruments of splash measurement used in work (a) designed splash cups; (b) conventional splash cups*

En total se instalaron 22 cápsulas, 11 del tipo de la Fig. 1a y otras tantas del tipo de la Fig. 1b. El experimento se realizó en un suelo forestal pedregoso de tipo Leptosol Rendzínico (FAO, 1988) desarrollado sobre calizas, desprovisto de vegetación tras la preparación de un cortafuegos en los bordes de las parcelas a quemar experimentalmente en la partida de la Concordia (municipio de Llíria). La pendiente media de la parcela experimental es de un 40%. Las propiedades físicas y químicas más relevantes del suelo de estudio pueden verse en la Tabla 1.

Tabla 1: Propiedades físicas y químicas más relevantes del suelo estudiado (0-5 cm superficiales).  
*Some physical and chemical properties of the studied soil (0-5 cm surface soil).*

Arena (%)	Limo (%)	Arcilla (%)	Est.Estr. (%)	Mat. Org. (%)	pH (H <sub>2</sub> O)	N <sub>tot</sub> (%)	CO <sub>3</sub> Ca (%)
44.2	39.6	16.2	27.4	10.5	7.65	0.64	52.5

Las cápsulas se colocaron aleatoriamente en una parcela de 20 m de largo por 4 m de ancho. La distancia mínima entre cápsulas fue de 50 cm. 3 réplicas de cada uno de los dos tipos de cápsulas se introdujeron en el suelo, dejando 0.5 cm de elevación sobre la superficie. Otras 3 de cada tipo se colocaron a 1.5 cm y otras 3 a 2.5 cm (3 réplicas x 3 alturas sobre la superficie del suelo x 2 diámetros de cápsula = 18). Además, otras 2 cápsulas de cada tipo, elevadas 0.5 cm sobre la superficie del suelo, se colocaron en el centro de sendos anillos metálicos de 50 cm de radio y 5 cm de altura, de los cuales, 2 cm están elevados sobre la superficie del suelo y los 3 cm restantes están introducidos en el suelo. El anillo metálico tiene una apertura orientada aguas abajo, para facilitar la evacuación de la escorrentía que se pudiera generar en el interior de la parcela. Los anillos metálicos, con las cápsulas elevadas 0.5 cm sobre la superficie del suelo colocadas en el centro, se instalaron con objeto de desviar la escorrentía cargada de sedimentos procedente de las partes superiores de la ladera en episodios de lluvia intensos y comparar estos resultados con los obtenidos a partir de cápsulas del mismo tamaño colocadas a la misma altura sobre la superficie del suelo, pero sin barreras físicas que eviten dicho efecto.

Las cápsulas se colocaron al principio del mes de Agosto de 1995. Cada cápsula se instaló en el sentido perpendicular a la superficie del suelo. Se extremaron las precauciones para evitar la perturbación de la estructura del suelo durante su instalación. Para ello, se mojó ligeramente el suelo, se introdujo un cilindro metálico de las dimensiones de la cápsula a instalar y se extrajo el suelo, para colocar después cada cápsula a la altura deseada. Aún así, se produjo distorsión en los alrededores de la cápsula, por lo que, después de su instalación, se estabilizó el suelo circundante añadiendo agua con cuidado para no generar escorrentía. La instalación de todas las cápsulas de 5 cm de diámetro se realizó de este modo. También las cápsulas de 8.5 cm de diámetro elevadas 0.5 cm sobre la superficie se instalaron de esta forma (se construyeron sin varilla de madera). No se ocasionó apenas distorsión al instalar las cápsulas de 8.5 cm de diámetro elevadas 1.5 y 2.5 cm sobre la superficie del suelo (1 cm corresponde a la altura de la cápsula y el resto es la distancia entre el borde inferior de ésta y la superficie del suelo; la diferencia hasta 10 cm es la longitud de varilla de madera introducida en el suelo).

Los resultados que se presentan en este trabajo corresponden a los 4 primeros episodios de lluvia ocurridos después de la instalación de las cápsulas. Estas lluvias ocurrieron el 31 de Agosto y el 4, 16 y 18 de Septiembre. Esta última lluvia, que fué muy intensa, generó un gran arrastre de suelo por escorrentía, lo que modificó la elevación de las cápsulas sobre la superficie del suelo. El experimento se detuvo aquí.

La cantidad de lluvia y su duración se registraron mediante un pluviómetro conectado a un datalogger, ambos colocados en el área de estudio. Para cada episodio de lluvia se determinó la Intensidad máxima en 30 minutos (I30). El estado de humedad del suelo antes de cada episodio de lluvia se determinó mediante la técnica del TDR, a través de sensores instalados permanentemente en el campo.

Después de cada episodio de lluvia se recogieron las cápsulas, se llevaron al laboratorio para determinar el peso de sedimento en cada una y se instalaron otras iguales en los mismos lugares que las anteriores.

La tasa de movilización por splash se ha determinado dividiendo el peso seco de sedimento (g) por la

superficie de cada cápsula ( $\text{cm}^2$ ). Para determinar la tasa real, los valores se han corregido en función del tamaño de la cápsula, mediante la ecuación de Poesen & Torri (1988):

$$\text{MSAR} = \text{MSA}e^{0.054 D} \quad (\text{Eq. 1})$$

donde MSAR es la tasa de splash corregida en función del diámetro ( $\text{g}/\text{cm}^2$ ), MSA es la tasa de splash sin corregir ( $\text{g}/\text{cm}^2$ ),  $e$  es la base de logaritmos neperianos y  $D$  es el diámetro de la cápsula (cm).

### 3. Resultados y discusión

En los gráficos de la Fig. 2 se representan, para cada episodio de lluvia, los valores correspondientes a las tasas de splash obtenidos para cada tipo de cápsula, corregidas según la Eq. 1, en función de la elevación sobre la superficie del suelo. Analizando visualmente los gráficos de dicha figura puede observarse que:

- para cada episodio de lluvia, cada tipo de cápsula y cada altura, las tasas de splash entre las tres réplicas son muy variables
- las tasas de splash tienden a disminuir con la elevación de las cápsulas sobre la superficie del suelo
- generalmente, las cápsulas de 5 cm de diámetro dan tasas de splash mayores que las de 8.5 cm.
- para cada tipo de cápsula y cada altura, las tasas de splash varían según las características de cada evento (intensidad de lluvia y estado de humedad del suelo).

#### *Fuentes de variación de las tasas de splash*

La gran variabilidad de los valores obtenidos refleja no sólo los errores de medida, sino también la gran variabilidad espacial de las propiedades del suelo alrededor de las cápsulas (cantidad de piedras, tamaño de agregados, microrrelieve, alteración de la estructura edáfica debido a la instalación etc.). Asimismo, también se observa que la variabilidad es, en general, mayor para las cápsulas de 5 cm de  $\varnothing$  y que, para cada tipo de cápsula, la variabilidad disminuye al disminuir su elevación sobre la superficie del suelo (ver Fig. 2). Por otra parte, la intensidad de lluvia, relacionada con el tamaño de la gota y su velocidad de caída, ejerce un papel decisivo en la movilización del suelo puesto que a mayor intensidad mayor es su energía cinética. Sin embargo, la efectividad de la lluvia para movilizar las partículas edáficas depende también del grado de humedad del suelo, ya que, en función de ésta, las partículas y agregados edáficos tienen mayor o menor cohesión, y ésta influye en su susceptibilidad para ser movilizadas.

#### *Variación de las tasas de splash con la elevación de las cápsulas sobre la superficie del suelo*

Como hemos mencionado anteriormente, las características de cada cápsula y las características de cada lluvia influyen en las tasas de splash. De ahí que, para determinar cual es el efecto de la altura de colocación de la cápsula en las tasas de splash, se hayan analizado sus variaciones para cada tipo de cápsula en cada episodio de lluvia. Los resultados se muestran en la Tabla 2. En ella puede observarse que las tasas de splash obtenidas con las cápsulas de 8.5 cm de  $\varnothing$  tienden a disminuir linealmente con la elevación de la cápsula sobre la superficie del suelo. Los ajustes obtenidos son significativos en los cuatro episodios de lluvia analizados. Las tasas de splash reales serían las obtenidas para una elevación sobre la superficie del suelo próxima a cero (término independiente de la recta de regresión).

Para las cápsulas de 5 cm de  $\varnothing$  (Tabla 2), estos ajustes son significativos solamente en el episodio del 18-9-95. Para este episodio (suelo húmedo e intensidad de lluvia alta), la tasa de splash que se obtendría con la cápsula a ras de suelo ( $T_{s_{\text{real}}}$ , término independiente de la recta de regresión) sería  $0.2749 \pm 0.0239 \text{ g}/\text{cm}^2$ , valor que coincide con la  $T_{s_{\text{real}}}$  estimada para las cápsulas de 8.5 cm de diámetro, para el mismo episodio ( $0.3002 \pm 0.0364 \text{ g}/\text{cm}^2$ ).

La falta de significación para las cápsulas de 5 cm en los tres episodios anteriores puede ser debida a una mayor variabilidad de los valores (ver Fig. 2), ocasionada probablemente por la mayor alteración de la estructura del suelo en los alrededores de la cápsula como consecuencia de su instalación, comparada con la pequeña perturbación observada en el campo para las de 8.5 cm.

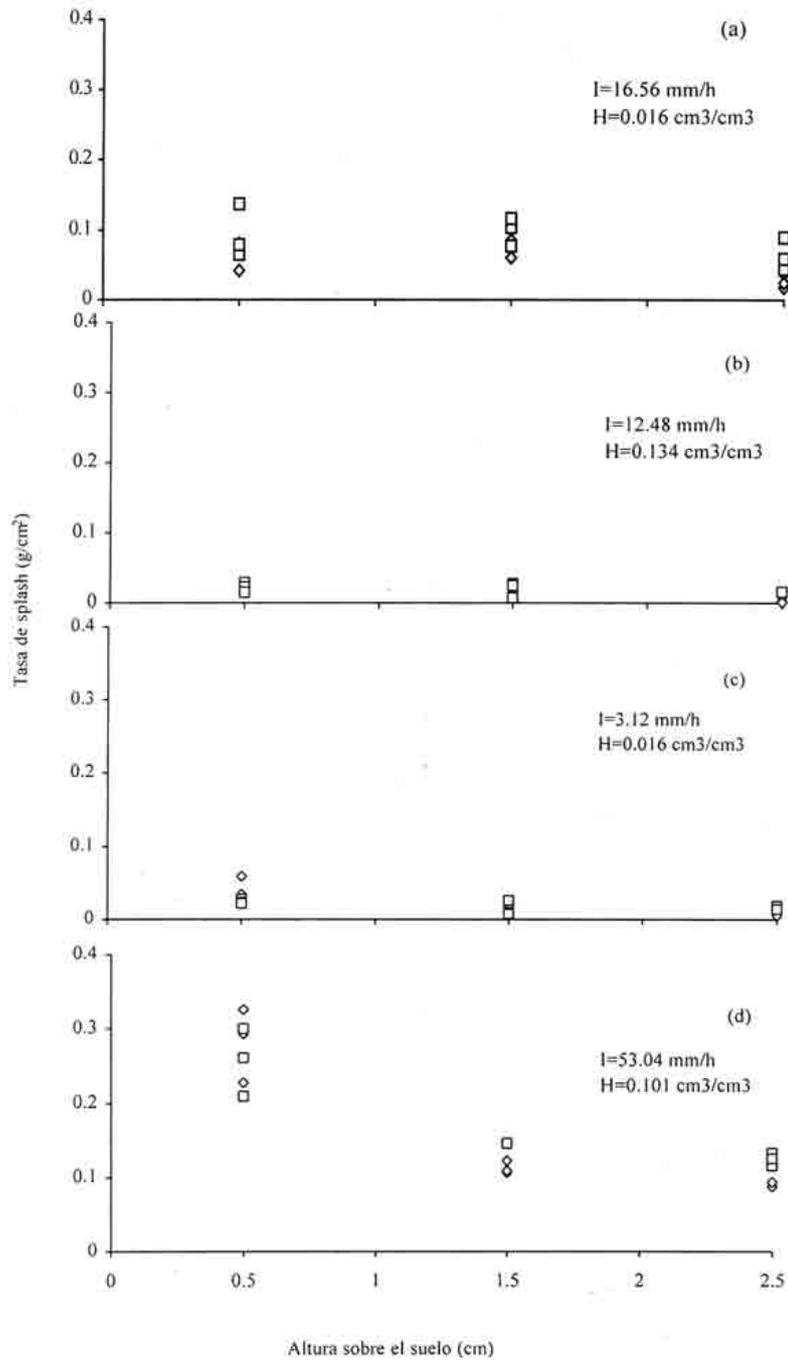


Fig. 2. Gráficos de dispersión de las tasas de splash (corregidas según Eq. 1 del texto) obtenidas para cada cápsula, a cada altura y en cada episodio de lluvia.  $\blacklozenge$  8.5 cm  $\square$  5 cm  $\emptyset$   
 (a) 31-8-1995, (b) 4-9-1995, (c) 16-9-1995, (d) 18-9-1995. I: Intensidad de lluvia; H: Humedad del suelo  
 Dispersion graph of splash rates (corrected with Eq. 1 in text) obtained for each cup, each elevation from the ground, and each rainfall event, (a) 31-8-1995, (b) 4-9-1995, (c) 16-9-1995, (d) 18-9-1995. I: Rainfall intensity; H: Soil moisture

Si se realiza el análisis de regresión lineal sin diferenciar entre episodios, el coeficiente  $R^2$  disminuye considerablemente ( $R^2=0.128$  para las cápsulas de 8.5 cm y  $R^2=0.061$  para las de 5 cm). Este resultado indica que las variaciones en las tasas de splash son episodio-dependientes. Por lo tanto, se requiere un tipo de corrección de las tasas de splash con la altura, específico para cada episodio.

Las relaciones lineales indicadas en la Tabla 2 pueden emplearse para corregir las tasas de splash obtenidas en el campo a una altura  $X$  (cm) sobre la superficie del suelo y así obtener las tasas de splash reales ( $TS_{real}$ ) para cuatro tipo de episodios: suelo húmedo e intensidad de lluvia alta; suelo húmedo e intensidad moderada; suelo seco e intensidad moderada y suelo seco e intensidad baja.

Tabla 2. Resultados del análisis de regresión lineal  $TS = aX + b$ , entre las tasas de splash ( $TS$ ,  $g/cm^2$ ) obtenidas con cada tipo de cápsula en cada evento y la elevación de la cápsula sobre el suelo ( $X$ , cm). La desviación standard de los coeficientes  $a$  y  $b$  de la ecuación se indica entre paréntesis.

*Results of the linear regression analysis  $TS = aX + b$ , between the splash rates ( $TS$ ,  $g/cm^2$ ) obtained for each type of cup in each event and the elevation of the cup from the soil surface ( $X$ , cm). Standard deviations of the  $a$  and  $b$  coefficients are given in brackets.*

Episodio			Cápsulas de 8.5 cm Ø			Cápsulas de 5 cm Ø		
			Coeficientes			Coeficientes		
Fecha	Intensidad (mm/h)	Hdad suelo ( $cm^3/cm^3$ )	$a$	$b=TS_{real}$	$R^2$	$a$	$b=TS_{real}$	$R^2$
31-8-95	16.5	0.016	-0.0198 (0.0077)	0.0836 (0.0133)	0.4797	-	-	0.1879
	Moderada	Seco						
4-9-95	12.5	0.134	-0.0084 (0.0012)	0.0233 (0.0020)	0.8732	-	-	0.1619
	Moderada	Húmedo						
16-9-95	3.12	0.016	-0.0173 (0.0036)	0.0482 (0.0062)	0.7605	-	-	0.2863
	Baja	Seco						
18-9-95	53.1	0.101	-0.0891 (0.0213)	0.3002 (0.0364)	0.6720	-0.0659 (0.0140)	0.2749 (0.0239)	0.7590
	Alta	Húmedo						

Otra de las ventajas de las cápsulas diseñadas, hace referencia al problema de la inundación del interior de la cápsula con los sedimentos arrastrados por el agua de escorrentía en episodios de lluvia intensos. Para ilustrar este punto, disponemos de los datos que se presentan en la Tab. 3. En dicha tabla se indican los resultados obtenidos en el experimento en el que se intentó evitar la inundación de las cápsulas mediante anillos metálicos que frenasen la escorrentía y retuviesen el sedimento arrastrado en sus paredes externas. En la tabla se comparan estos resultados con los obtenidos para cápsulas similares en las que se observó entrada de sedimento procedente del flujo de escorrentía.

Sólo en las dos lluvias de mayor intensidad se observó entrada de sedimentos por escorrentía en las cápsulas. En la lluvia del 31 de agosto, 2 de las 3 cápsulas de 8.5 cm de diámetro colocadas a 0.5 cm sobre la superficie del suelo sin anillo protector, se inundaron. Sólo se observó inundación en 1 de las 3

cápsulas de 5 cm de diámetro. En la lluvia del 18 de septiembre, que fue mucho más intensa que la del 31, dos cápsulas de cada diámetro presentaron evidencias claras de entrada de escorrentía y sedimentos.

Tabla 3: Comparación de las tasas de splash obtenidas cuando las cápsulas se inundan con los sedimentos procedentes de la escorrentía, con las obtenidas cuando este efecto se evitó. \* Media de 3 muestras.  
*Comparison of splash rates obtained from cups with evidences of surface runoff collection, with those obtained from cups which were protected from runoff. \* Mean of three replicates.*

Episodio	Altura sobre el suelo (cm)	Tasas de splash (g/cm <sup>2</sup> )			
		Sin anillo protector		Con anillo protector	
		8.5 cm Ø	5cm Ø	8.5 cm Ø	5 cm Ø
I=16.56 mm/h (31-8-95)	0.5	0.178	-	0.066*	0.159*
		0.219	0.202		
I=53.04 mm/h (18-9-95)	0.5	2.56	4.14	0.28*	0.26*
		1.69	0.51		

En el campo también pudimos observar que, después de esta intensa lluvia, las cápsulas de 8.5 cm de diámetro colocadas a 1.5 cm sobre la superficie del suelo, no retuvieron sedimentos en sus paredes externas sino que éste se acumuló debajo de la cápsula. Sin embargo, algunas de las cápsulas de 5 cm de diámetro colocadas también a 1.5 cm sobre la superficie del suelo presentaron evidencias claras de retención de sedimentos en sus paredes e incluso entrada de éstos en su interior. Si bien es cierto que, para confirmar la validez de estos datos, se requiere mayor número de repeticiones y también mayor número de episodios de lluvia intensos, hay evidencias que sugieren que una elevación de 1.5 cm sobre el suelo es la recomendable para las nuevas cápsulas, puesto que, por un lado, evitar el problema de la entrada de sedimentos y escorrentía que se produce cuando se colocan a 0.5 cm sobre la superficie, y, por otro, recogen más sedimento que en el caso de colocarlas a 2.5 cm, lo que garantiza una mayor fiabilidad del resultado. La escasez de datos no permite comparar las tasas de splash obtenidas con anillo y sin anillo protector, aunque es obvio que, si las nuevas cápsulas colocadas a 1.5 cm sin anillo protector, evitan el problema de la inundación en episodios de lluvia muy erosivos (1.2 Kg/m<sup>2</sup> de suelo movilizado por escorrentía en el episodio del 18-9-95) no es necesario ni conveniente instalarlo. Para confirmar los resultados obtenidos, se han instalado, en el área de estudio, 66 cápsulas del tipo diseñado a la altura de 1.5 cm, cubriendo un amplio rango de situaciones microtopográficas. Los resultados preliminares indican que será necesario, después de cada episodio intenso, eliminar la acumulación de sedimentos debajo de ellas por un lado, y reajustar su elevación sobre la superficie por otro lado, dado que la pérdida de suelo por erosión va dejando cada vez más elevada la cápsula. Asimismo, habrá que corregir las tasas de splash en función de su elevación sobre el suelo, y como veremos, también en función del tipo de cápsula.

#### *Variación de las tasas de splash en función del tipo de cápsula*

Para corregir la subestimación de las tasas de splash debidas al tamaño de la cápsula, los valores obtenidos para cada cápsula de nuestro experimento se corrigieron con la ecuación de Poesen & Torri 1988 (Eq. 1 en el texto). Sin embargo, a pesar de esta corrección, los valores medios obtenidos en cada episodio de lluvia indican que las cápsulas de 8.5 cm tienden a dar tasas de splash ligeramente menores que las cápsulas de 5 cm. Para analizar si existe algún tipo de relación entre ambas series de valores, hicimos un análisis de regresión de las tasas de splash obtenidas para todos los episodios de lluvia y todas las alturas sobre la superficie del suelo. Los resultados se presentan en la Fig. 3. Como puede observarse, el coeficiente de correlación lineal obtenido es muy alto ( $R^2 = 0.91$ ) lo que indica que las tasas de splash obtenidas con uno y otro tipo de cápsulas están bien correlacionadas. El signo negativo ( $-0.0122 \pm 0.0055$ ) del término independiente de la recta de regresión indica que las tasas de splash obtenidas con las cápsulas de 8.5 cm son menores que las obtenidas con las de 5 cm. Sin embargo, la corrección realizada mediante la Eq. 1 debería haber resultado en tasas de splash semejantes para ambas series de valores. Las diferencias detectadas en nuestro experimento no se deben pues al diámetro, sino a la diferente forma de la cápsulas.

Por ejemplo, pueden haberse producido pérdidas de sedimento por splash (movilización de los sedimentos recogidos en la cápsula por impacto de las gotas de lluvia) en las cápsulas diseñadas por nosotros, puesto que el sedimento retenido puede saltar hacia afuera dado que la altura propia de la cápsula es de sólo 1 cm (ver Fig. 1a), frente a los 3 cm de altura en la cápsula convencional (ver Fig. 1b). La relación obtenida en la Fig. 3 reflejaría dicho efecto.

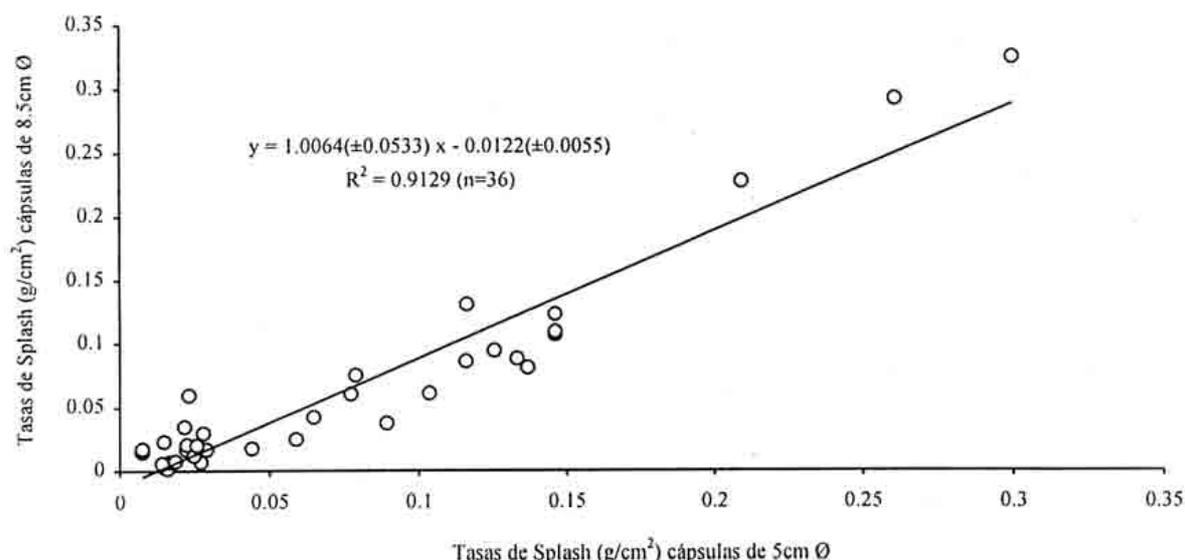


Fig. 3. Resultado del análisis de regresión lineal entre las tasas de splash obtenidas con las cápsulas de 8.5 cm de diámetro y las de 5 cm de diámetro para todas las alturas y todos los episodios de lluvia. (Results of the linear regression analysis between splash rates obtained with the 8.5 cm diameter cups and the 5 cm diameter cups, for all elevations from the soil surface and all rainfall events)

*Variaciones temporales de las tasas de splash. El papel de la intensidad de la lluvia y de la humedad del suelo*

En la Tabla 4 se muestran los valores medios de las tasas de splash y sus desviaciones típicas, obtenidos para las cápsulas de 8.5 cm de diámetro colocadas a 1.5 cm sobre el suelo, en cada episodio de lluvia. En la misma tabla también se muestran la intensidad de la lluvia de cada episodio y el contenido de humedad del suelo antes de cada lluvia.

Como puede observarse en la Tab. 4, las tasas medias de splash varían de una lluvia a otra en el orden lluvia del 18-9 > lluvia del 31-8 > lluvia del 16-9 > lluvia del 4-9. La intensidad de la lluvia es el factor que más explica las diferencias en las tasas de splash entre los dos primeros y los dos segundos (53 y 16 mm/h frente a 3 y 12 mm/h de los dos segundos). Esta explicación es coherente con los resultados de otros autores, que indican que la susceptibilidad del suelo al impacto de la gota aumenta con la intensidad de la lluvia (Wustamidin & Douglas, 1985; Shainberg et al., 1992; Truman et al., 1990; Truman & Bradford, 1993). Sin embargo, las diferencias en las tasas de splash entre los episodios del 16 y del 4 de septiembre, no pueden ser explicadas por la intensidad, ya que el episodio del día 16 fué mucho menos intenso que el del día 4 pero las tasas de splash fueron mayores. Una explicación para este resultado puede ser la diferencia en el estado de humedad del suelo. Como indican algunos autores (Le Bissonnais et al.,

1989; Truman & Bradford, 1990), los agregados de suelo en estado húmedo son más resistentes al impacto de la lluvia que los que están secos. Los resultados obtenidos para las lluvias de los días 4 y 16 de septiembre indican que la humedad del suelo puede ser un factor tan importante como la intensidad al explicar las tasas de splash. Como se observa en la Tabla 4, el suelo estaba húmedo antes de la lluvia del día 4 (cuatro días antes cayeron 9.36 mm en 70 min.). Sin embargo, el suelo estaba casi seco antes de la lluvia del 16 (transcurrieron 12 días desde la lluvia del día 4, tiempo suficiente para secarse el suelo).

Tabla 4: Comparación de la intensidad de lluvia y el estado de humedad del suelo en cada episodio con las tasas de splash obtenidas para las cápsulas de 8.5 cm de  $\emptyset$  colocadas a 1.5 cm de altura.  
(*Comparison of rainfall intensity and initial soil moisture content with splash rates obtained for the 8.5 cm  $\emptyset$  cups elevated 1.5 cm from the ground*)

Episodio	Intensidad de lluvia (mm/h)	Humedad del suelo (cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> )	Tasa de splash (g/cm <sup>2</sup> )
18-9-95	53.04	0.101	0.11±0.0086
31-8-95	16.56	0.016	0.07±0.0014
16-9-95	3.12	0.016	0.02±0.0017
4-9-95	12.48	0.134	0.01±0.0041

#### 4. Conclusiones

Aunque los resultados obtenidos son preliminares y es necesario un mayor número de réplicas en el espacio y en tiempo para poder generalizar las tendencias observadas, el instrumento de medida diseñado para determinar las tasas de splash en laderas heterogéneas escarpadas, mejora la calidad de los resultados por dos razones: porque la distorsión de la estructura del suelo debida a su instalación es mínima y porque, a igual elevación sobre la superficie del suelo, resultan más efectivas que las cápsulas tradicionales evitando la masiva entrada de escorrentía y sedimentos generados por lluvias intensas.

Las tasas de splash obtenidas con las cápsulas de 8.5 cm de diámetro son inferiores a las obtenidas con las de 5 cm, por lo que se han de corregir en función del diámetro (Poesen y Torri, 1988) y de la forma de la cápsula. La correlación obtenida entre ambos tipos de cápsulas permite esta corrección.

Para las cápsulas de 8.5 cm, las tasas de splash decrecen linealmente con la elevación sobre la superficie del suelo. Las relaciones lineales obtenidas son específicas para cada evento y dependen de la intensidad de la lluvia y del contenido de humedad del suelo. Dichas relaciones permiten determinar las tasas de splash reales para intensidades de lluvia y estado de humedad del suelo similares a las del estudio. Sin embargo, se requiere un rango de condiciones experimentales más amplio para estudiar la influencia en las tasas de splash de cada uno de estos dos parámetros.

Para lluvias erosivas es recomendable colocar las nuevas cápsulas elevadas a 1.5 cm sobre la superficie del suelo. Las tasas de movilización de suelo por splash obtenidas tras las correcciones con el diámetro, la altura y la forma de la cápsula varían entre 0.096 g/cm<sup>2</sup> para una intensidad de 16 mm/h y suelo seco y 0.31 g/cm<sup>2</sup> para una intensidad de 53 mm/h y suelo húmedo. Mediante este tipo de correcciones se estandarizan los resultados, lo que permite comparar éstos con los obtenidos para el mismo suelo afectado por el fuego o con los obtenidos para otros suelos mediante las cápsulas de splash tradicionales.

### Agradecimientos

Este trabajo ha sido realizado en el marco de los proyectos Post-fire soil and vegetation dynamics in natural and afforested areas in Southern Europe: The role of fire intensity (EV5V-91-0017) financiado por la Unión Europea, y El balance hídrico y térmico del suelo incendiado en relación a sus propiedades físicas (IVEI-082) financiado por el Institut Valencià d'Estudis i Investigació.

Los autores expresan su agradecimiento al CIDE y a su director J.L. Rubio, por facilitarnos el uso de las instalaciones de campo y a F. Martínez por su valiosa ayuda en la construcción de las cápsulas de splash.

### Referencias bibliográficas

- Bollinne, A.** (1975). La mesure de l'intensité du splash sur sol limoneux. Mise a point d'une technique de terrain et premiers résultats. *Pedologie*, 25: 199-210.
- Le Bissonnais, Y., Bruand, A. & Jagne, M.** (1989). Laboratory experimental study of soil crusting: relation between aggregate breakdown mechanisms and crust structure. *Catena*, 16: 377-392.
- Morgan, R.** (1978). Field studies of rainsplash erosion. *Earth Surface Processes*, 3: 295-299.
- Poesen, J. & Torri, D.** (1988). The effect of cup size on splash detachment and transport measurements. Part I: Field measurements. *Catena Supplement*, 12: 113-126.
- Torri, D., Sfalanga, M. & Del Sette, M.** (1987). Splash detachment: runoff depth and soil cohesion. *Catena*, 14: 149-155.
- Truman, C.C. & Bradford, J.M.** (1990). Effect of antecedent soil moisture on splash detachment under simulated rainfall. *Soil Sci.* 150: 787-798.
- Truman, C.C. & Bradford, J.M.** (1993). Relationships between rainfall intensity and the interrill soil loss-slope steepness ratio as affected by antecedent water content. *Soil Sci.* 156: 405-413.
- Truman, C.C., Bradford, J.M. & Ferris, J.E.** (1990). Antecedent water content and rainfall energy influence on soil aggregate breakdown. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 54: 1385-1392.
- Savat, J & Poesen, J.** (1981). Detachment and transportation of loose sediments by rain-drop splash. Part I: the calculation of absolute data on detachability and transportability. *Catena*, 8: 1-17.
- Shainberg, I., Levy, G.J., Rengasamy, P. & Frenkel, H.** (1992). Aggregate stability and seal formation as affected by drops' impact energy and soil amendments. *Soil Sci.* 154:113-119.