

# **Descripción y puesta a punto de un simulador de lluvia de campo para estudios de escorrentía superficial y erosión del suelo**

## Design and operation of a rainfall simulator for field studies of runoff and soil erosion

BENITO, E.<sup>1</sup>; de BLAS, E.<sup>1</sup>; SANTIAGO, J. L.<sup>1</sup> & VARELA, M. E.<sup>1</sup>

### **ABSTRACT**

**The present paper describes the design, construction, calibration and operation of a spray rainfall simulator. The design of the plots used for the purpose of this study is also described in order to determine hydrological and erosion parameters.**

**Selected rainfall intensity of 64 mm h<sup>-1</sup> are representative of heavy storm conditions in Galicia. Drop size distribution results in these conditions, a D<sub>50</sub> of 1.2 mm, were similar to those calculated for natural rainfall by BUBENZER (1979). Fall velocities reached were between 75 and 100% terminal velocity, depending on drop diameter and 13.05 J m<sup>-2</sup> mm<sup>-1</sup> kinetic energy was obtained.**

**Surface area of the plots used was 1 m<sup>2</sup>, surrounded by a metal structure connected to a V-shaped system to collect the surface runoff and sediment produced in the different experiments.**

**Key words: rainfall simulator, runoff, soil loss, infiltration.**

(1) Departamento de Biología Vegetal y Ciencia del suelo. Facultad de Ciencias. Universidad de Vigo. 36200 Vigo.

## INTRODUCCIÓN

Los simuladores de lluvia son instrumentos de investigación diseñados para aplicar agua de forma similar a los episodios tormentosos naturales. Son útiles para obtener datos de erosión, infiltración, escorrentía superficial y transporte de sedimentos. No obstante, las características de la lluvia natural han de ser simuladas de forma adecuada, los datos de escorrentía/erosión obtenidos han de ser analizados cuidadosamente y se debe efectuar una buena interpretación de los resultados para obtener una información fiable en las condiciones para las que ha sido aplicada la lluvia simulada.

El principal problema que presentan es la falta de precisión para replicar las características de un episodio tormentoso natural específico (BRYAN, 1981; LAL, 1988) ya que su utilización viene determinada por la necesidad de tener bajo condiciones controladas las características de la lluvia, intentando una aproximación lo más acertada posible a las condiciones de la lluvia natural. Las principales características de la lluvia natural que han de conseguir los simuladores de lluvia son las siguientes (MEYER, 1965; BUBENZER, 1979):

- Distribución del tamaño de las gotas de lluvia similar a la de la lluvia natural.
- Velocidad de impacto similar a la velocidad terminal de las gotas en la lluvia natural.
- Intensidad de lluvia correspondiente a las condiciones naturales.
- Energía cinética similar a la de la lluvia natural.
- Lluvia uniforme y distribución aleatoria de las gotas.

Existe una amplia bibliografía acerca de los distintos simuladores de lluvia que han sido utilizados en los últimos años por distintos investigadores y los diferentes tipos son seleccionados en función de la disponibilidad, costes de construcción y del objetivo experimental, no existiendo hasta la fecha una total estandarización en los diseños o metodología que se emplea, aunque se pueden diferenciar claramente dos grandes grupos:

1. Aquellos que utilizan el método de goteo para la producción de lluvia, donde la velocidad inicial de las gotas es cero. Dentro de este grupo podemos citar los simuladores descritos por CHOW & HARBAUGH (1965), WARD *et al.* (1981), SANROQUE *et al.* (1984) y KAMPHORST (1987) entre otros. Aunque su coste es relativamente bajo, la principal desventaja de estos simuladores es que la velocidad terminal en caída libre se consigue para las gotas de lluvia de mayor diámetro solamente para alturas de caída de 12 m (HUDSON, 1971), siendo una altura muy elevada para trabajar con un simulador tanto en el laboratorio como en el campo.

2. Aquellos que utilizan el mecanismo de boquillas pulverizadoras, donde el agua sale a una determinada velocidad por estar sometida a una presión inicial determinada.

Su principal ventaja es que en función de la boquilla seleccionada, de la presión de salida del agua y de la altura a la que se sitúa, se pueden obtener lluvias de intensidades y energías muy diferentes y seleccionar aquellas que correspondan a las características de la lluvia natural de la zona. Ejemplos de estos simuladores serían

los descritos por MEYER & Mc CUNE (1958), BRYAN (1968), BUBENZER & JONES (1971), ROTH *et al.* (1985), BENITO *et al.* (1986), NAVAS *et al.* (1990), CERDÁ *et al.* (1997). Su mayor problema estriba en que suelen obtenerse distribuciones de tamaños de gota óptimos (similares a la lluvia natural) para intensidades demasiado elevadas, por lo que han tenido que introducirse mecanismos que permitan disminuir la intensidad manteniendo esa distribución de gotas. Como sistemas correctores de la intensidad se han utilizado discos giratorios con una muesca radial (MORIN *et al.*, 1967) o bien se ha optado por situar la boquilla en un sistema oscilante (MEYER & HARMON, 1979; NEIBLING *et al.*, 1981).

Las boquillas utilizadas para estos simuladores son normalmente de dos tipos (suministradas por Spraying Systems Co.): Fulljet, con un área de impacto circular o cuadrada, proporcionando una pulverización continua, y Veejet, con un área de impacto rectangular estrecha y son empleadas en simuladores que proporcionan una pulverización intermitente.

Las principales desventajas de este tipo de simuladores son que la energía de las gotas es constante independientemente de la intensidad de aplicación (HIGNETT *et al.* 1995). La distribución del tamaño de gotas también es constante y el máximo diámetro de gota no se incrementa con la intensidad como ocurre en los episodios tormentosos naturales. Otros inconvenientes serían su elevado consumo de agua y la mayor complejidad y coste de su montaje.

Recientemente, AGASSI & BRADFORD (1999) han realizado una amplia discusión sobre los principales problemas

que presentan las experiencias con lluvia simulada en el laboratorio y en el campo, considerando como mejor alternativa para evaluar los efectos de la intensidad de la lluvia y de la energía cinética en la estabilidad de agregados y pérdida de suelo el seleccionar uno de los dos tipos de boquillas anteriormente mencionados y emplear al menos tres de ellas con diferentes flujos con el fin de alcanzar distintas energías cinéticas a la vez que se varía la intensidad. Además concluyen que la estandarización del diseño de los simuladores de lluvia y de los tests de procedimiento, es fundamental para poder realizar una adecuada comparación entre los resultados de erosión obtenidos por diferentes investigadores.

En este trabajo se describen las características y el funcionamiento de un simulador de lluvia portátil tipo boquilla pulverizadora junto con el equipamiento de la parcela experimental para determinar diferentes parámetros hidrológicos y erosivos de los suelos.

## DESCRIPCION DEL SIMULADOR DE LLUVIA

El simulador de lluvia, que se construyó artesanalmente, está formado por una estructura metálica con forma de pirámide truncada elaborada con tubos de aluminio de 3 cm de diámetro (figura 1). Las patas telescópicas permiten adaptar el simulador a la pendiente el terreno.

En su parte superior se ha soldado una placa metálica en la cual se conecta una boquilla pulverizadora (Fulljet 1/8 GG6SQ de Spraying Systems Co.) (figura 2) como sistema generador de lluvia con



**Figura 1. Simulador de lluvia.**

características similares al empleado por NAVAS *et al.* (1990). Este sistema genera un modelo de aspersión con una zona de impacto cuadrada, obteniendo ángulos de aspersión entre  $40^\circ$  y  $105^\circ$  y caudales de  $0.9$  a  $7.7 \text{ L min}^{-1}$  para presiones de trabajo que oscilan entre  $0.01$  y  $1 \text{ MPa}$ . La unidad de bombeo consiste en una bomba de presión (Jabsco ITT) conectada a una batería de  $12$  voltios y a un sistema regulador de presión con un manómetro y una llave de paso que nos permite regular de forma

manual la presión de salida del agua. El suministro de agua se realiza desde un tanque de  $50$  litros y mediante un sistema de mangueras de goma que permiten el transporte hasta la boquilla.

Finalmente, se coloca un protector de viento confeccionado con una fina tela de rejilla plástica, con el fin de evitar interferencias durante el experimento.

Las experiencias se realizaron por duplicado en parcelas de  $1 \text{ m}^2$  de superficie delimitadas por tres láminas metálicas



**Figura 2. Sistema generador de lluvia**

de 1 m de longitud que se colocan en el suelo, con cuidado de no alterarlo. La parcela, se cierra en su parte frontal con una estructura también metálica en forma de V con un orificio de salida en el vértice que permite recoger la escorrentía superficial y el sedimento generado durante el experimento (figura 3).

### **PUESTA A PUNTO DEL SIMULADOR DE LLUVIA**

- **Intensidad de lluvia:** Se seleccionó una intensidad de  $64 \text{ mm h}^{-1}$  obtenida aplicando una presión de 0.02 MPa y una

altura de caída de 2 metros que se correspondería con tormentas de alta intensidad en el NW de España.

- **Distribución del tamaño de gotas:**

Debido a que las lluvias naturales presentan un amplio margen de tamaños de gota, el tamaño medio de las mismas y su porcentaje de distribución puede ser empleado para caracterizar el tipo de lluvia que se quiere emplear. La medida de los diámetros de gota de la lluvia simulada se realizó mediante el método de las bolitas de harina (HUDSON, 1964). De todas formas no es fácil describir una distribución mediante este único parámetro, ya que



**Figura 3. Parcela experimental.**

arroja poca información acerca de cómo está formada, y probablemente uno de los mejores índices para las distribuciones de gota es el diámetro del volumen mediano ( $D_{50}$ ), o diámetro correspondiente a la mediana del volumen: diámetro de gota para el que la mitad, en volumen, de la precipitación cae en gotas menores, y la otra mitad en gotas mayores. En la figura 4 se representa la distribución en % de los tamaños de gota, así como la curva de frecuencias acumuladas obtenida para la intensidad de lluvia seleccionada, encontrándose una distribución muy similar a la indicada por BUBENZER (1979) para lluvias naturales.

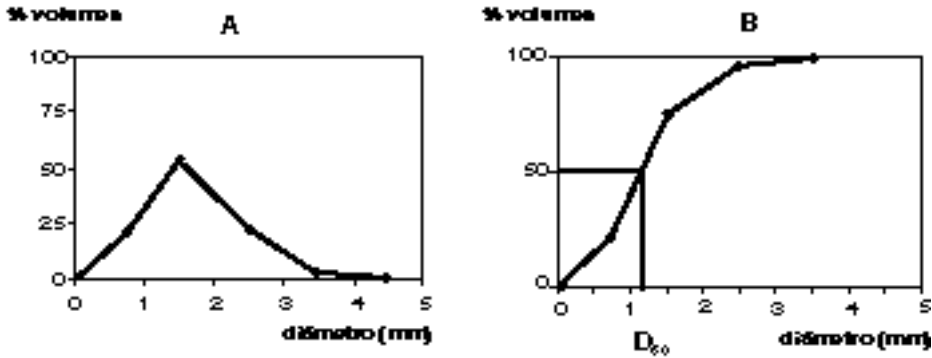
El diámetro mediano de gota para la intensidad de lluvia seleccionada resultó ser de 1.2 mm, similar al obtenido por otros autores trabajando con lluvias simuladas de alta intensidad (CERDA *et al.*,

1997; SOTO, 1993; ASSELINE y VALENTIN, 1978).

• **Velocidad de las gotas** la velocidad de caída de las gotas puede obtenerse como el resultado de su peso y de la fuerza de tracción. De acuerdo con BENITO *et al.*, 1986, donde el efecto de empuje de la fuerza del aire es despreciado, se puede calcular la velocidad de caída de las gotas a partir de la velocidad inicial, la altura de caída y el coeficiente de rozamiento, mediante el empleo de la siguiente ecuación:

$$v_f = \sqrt{g/\gamma - (g/\gamma - v_0^2)e^{-2kx}}$$

donde  $g$  es la aceleración de la gravedad,  $k$  el coeficiente de rozamiento,  $v_0$  la velocidad inicial y  $x$  la altura de caída. Se calculó para una altura de caída de 2 m y para cada uno de los tamaños de gota



**Figura 4. Distribución de tamaños de gota obtenida para la intensidad de lluvia seleccionada, expresada como % del volumen de cada uno los tamaños (A) y en % del volumen acumulado (B).**

correspondiente a la intensidad de lluvia seleccionada.

La velocidad inicial a la salida de la boquilla se obtiene mediante la expresión:

$$V_0 = Q / S$$

donde Q es el caudal en  $m^3 s^{-1}$  y S la sección de la boquilla. Para la presión seleccionada (0.02 MPa) y sabiendo que la superficie de impacto generada por la boquilla es de  $1.8 m^2$  podemos conocer el caudal ( $Q = 1.95 \times 10^{-5} m^3 s^{-1}$ ). La sección de la boquilla se calculó a partir de su diámetro obteniéndose un valor de  $4.52 m^2$ . Calculados Q y S, la velocidad inicial resultó ser de  $4.314 m s^{-1}$ .

Con esta velocidad inicial y los valores de coeficiente de rozamiento establecidos por LAWS (1941), se pueden calcular las velocidades que llevarán las gotas de distinto tamaño que caen desde 2 metros de altura, dotadas de dicha velocidad inicial, utilizando la ecuación de BENITO *et al.* (1986) descrita anteriormente.

Los resultados obtenidos para los dife-

rentes tamaños de gota de lluvia se presentan en la tabla 1:

De acuerdo con los resultados experimentales obtenidos por LAWS (1941) para la velocidad terminal de las gotas en lluvias naturales, estas velocidades de caída representarían entre el 85-100 % de la velocidad terminal para las gotas < 2 mm y entre un 75-85 % para las gotas de 2 a 3.5 mm. Estos resultados coinciden con los obtenidos para otros simuladores de características similares (NAVAS *et al.*, 1990; BENITO *et al.*, 1986).

• **Energía cinética.** Conociendo previamente el diámetro de las gotas y su velocidad de caída se puede calcular la energía cinética para cada tamaño de gota y posteriormente mediante la suma de las energías parciales se obtiene la energía total de la lluvia simulada. El valor obtenido fue de  $13.05 J m^{-2} mm^{-1}$ . Este valor es similar al obtenido por BENITO *et al.* (1986) para una lluvia de  $45 mm h^{-1}$  ( $13.6 J m^{-2} mm^{-1}$ ) y NAVAS *et al.* (1990) ( $13.1 J m^{-2} mm^{-1}$  para una intensidad de lluvia de  $48 mm h^{-1}$  y  $13 J m^{-2} mm^{-1}$  para una

Diámetro de gota (mm)	0.5	1.25	1.5	2	2.5	3	3.5
$\gamma$ (LAWS, 1941)	0.62	0.47	0.38	0.26	0.20	0.16	0.13
Velocidad de caída ( $m s^{-1}$ )	4.04	4.57	4.96	5.61	5.99	6.27	6.50

**Tabla 1. Valores de coeficiente de rozamiento ( $\gamma$ ) según LAWS (1941) y velocidad de caída calculada para los diferentes tamaños de gota en las condiciones de trabajo.**

intensidad de lluvia de  $58 \text{ mm h}^{-1}$ ). Sin embargo cuando se compara con los valores obtenidos por WISCHMEIER y SMITH (1958) para lluvias naturales, la diferencia es del orden del 50 %.

## CONCLUSIONES

El simulador de lluvia construido ha resultado ser un instrumento de fácil aplicación en el campo, destacando su movilidad y su fácil transporte. La autonomía del simulador permite realizar aproximadamente 4 experiencias diarias por lo que pueden hacerse suficientes repeticiones para una condición específica del suelo y obtener así datos útiles de diferentes parámetros hidrológicos y erosivos.

Las características de la lluvia simulada reflejan velocidades de caída de las gotas similares a las de las lluvias naturales. Sin embargo, se obtiene un porcentaje pequeño de las gotas de mayor tamaño, por lo que los valores de energía cinética son inferiores a los de la lluvia natural.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a F. Díaz-Fierros de la Universidad de Santiago de Compostela por su contribución en el diseño original del simulador de lluvia.

Este trabajo ha sido subvencionado con cargo a los fondos de investigación proporcionados por el proyecto XUGA 30102A97.



**BIBLIOGRAFIA**

- AGASSI, M. & BRADFORD, J.M. (1999). Methodologies for interrill soil erosion studies. *Soil and Tillage Research*, **49**: 277-287.
- ASSELIN, J. & VALENTIN, C. (1978). Construction et mise au point d'un infiltromètre à aspersion. *Cahiers ORSTOM. Série Hydrologie*, **15**: 321-349.
- BENITO RUEDA, E.; GOMEZ-ULLA, A. & DÍAZ-FIERROS VIQUEIRA, F. (1986). Descripción de un simulador de lluvia para estudios de erodibilidad del suelo y estabilidad de los agregados al agua. *Anales de Edafología y Agrobiología*, **XLV** (9-10): 1115-1126.
- BRYAN, R.B. (1968). Development of laboratory instrumentation for the study of soil erodibility. *Earth Science Journal*, **2**: 38-50.
- BRYAN, R.B. (1981). Soil erosion under simulated rainfall in the field and laboratory: variability of erosion under controlled conditions. *Erosion and Sediment Transport Measurement. IAHS publ.*, n° 133.
- BUBENZER, G.D. (1979). Rainfall characteristics important for simulation. *In: Proceedings of the rainfall simulator workshop. Tucson, Arizona.* Department of agriculture, science and education administration. ARM-W-10: 22-35.
- BUBENZER, G.D. & JONES, B.A. (1971). Drop size and impact velocity effects on the detachment of soils under simulated rainfall. *Trans. of the ASAE*, **14** (4): 625-628.
- CERDÁ, A.; IBÁÑEZ, S. & CALVO, A. (1997). Design and operation of a small and portable rainfall simulator for rugged terrain. *Soil Technology*, **11**: 163-170.
- CHOW, W.T. & HARBAUGH, T.E. (1965). Raindrop production for laboratory watershed experimentation. *J. Geophys. Res.*, **70** (24): 6111-6119.
- HIGNETT, C.T.; GUSLI, S.; CASS, A. & BESZ, W. (1995). An automated laboratory rainfall simulation system with controlled rainfall intensity, raindrop energy and soil drainage. *Soil Technology*, **8**: 31-42.
- HUDSON, N.W. (1964). The flour pellet method for measuring the size of raindrops. *Department of conservation and extension. Research Bulletin*, **4**: 28 pp.
- HUDSON, N.W. (1971). *Soil Conservation*. B.T. Batsford Ltd, London.
- KAMPHORST, A. (1987). A small rainfall simulator for the determination of soil erodibility. *Netherlands Journal of Agricultural Science*, **35**: 407-415.
- LAL, R. (1988). Soil erosion by wind and water: problems and prospects. *In: Lal, R. (ed). Soil erosion research methods.* Soil and Water Conservation Society, Ankeny, IA: 16.
- LAWS, J.O. (1941). Measurements of the fall velocity of water drops and raindrops. *Transactions of the American Geophysical Union*, **22**: 709-721.
- MEYER, L.D., 1965. Simulation of rainfall for soil erosion research. *Trans of the ASAE*, **8**: 63-65.
- MEYER, L.D. & Mc CUNE, D.L. (1958). Rainfall simulator for runoff plots. *Agricultural Engineering*, **39**: 644-648.
- MEYER, L.D. & HARMON, W.C. (1979). Multiple intensity rainfall simulator for erosion research on row side slopes. *Trans. of the ASAE*, **22**: 100-103.
- MORIN, J.; GOLDBERG, D. & SEIGNER, I. (1967). A rainfall simulator with a rotating disc. *Trans of the ASAE*, **8** (1): 67-68.
- NAVAS, A.; ALBERTO, F.; MACHIN, J. & GALAN, A. (1990). Design and operation of a rainfall simulator for field studies of runoff and soil erosion. *Soil Technology*, **3**: 385-397.
- NEIBLING, W.H.; FOSTER, G.R.; NATTERMAN, R.A.; NOWHIN, J.O. & HOLBERT, P.V. (1981). Laboratory and field testing of a programmable plot-sized rainfall simulator. *In: Erosion and sediment transport measurement, proceedings to the Florence Symposium.* IAHS publication, **133**: 405-414.
- ROTH, C.H.; MEYER, B. & FREDE, H.G. (1985). A portable rainfall simulator for studying factors affecting runoff, infiltration and soil loss. *Catena*, **12**: 79-85.
- SANROQUE, P.; RUBIO, J.L. & SANCHEZ, J. (1984). Simulador de lluvia para el estudio de la erosionabilidad del suelo en el laboratorio. *I Congreso de Geología.* Tomo I: 788-794.
- SOTO, B. (1993). *Influencia de los incendios forestales en la fertilidad y erosionabilidad de los suelos de Galicia.* Tesis Doctoral. Universidad de Santiago de Compostela.
- WARD, A.D.; WELLS, L.G.; DAY, G.B. & PHILLIPS, R.E. (1981). Drainage and rainfall instrumented probe network design. *University of Kentucky. ASAE paper* n° ser. 81-016.
- WISCHMEIER, W.H. & SMITH, D.D. (1958).

Rainfall energy and its relationship to soil loss.  
*Transactions of the American Geophysical Union,*  
**39**: 284-291.