
DISEÑO Y EVALUACIÓN DE UN SIMULADOR DE LLUVIAS TIPO GOTERO CON EFECTO VIBRATORIO

Desing and evaluation a rain drop simulator with vibratory effect rain drop simulator

Aitor Achutegui¹, Xiomara Abreu¹ y María Luisa Páez²

¹ Instituto de Agronomía, Facultad de Agronomía, Universidad Central de Venezuela, Apdo. 4579, Maracay 2101 A.

² Particular.

Resumen

Los objetivos de este trabajo fueron: diseñar y construir un simulador de lluvias tipo gotero que reproduzca el efecto del viento sobre la gota de agua; diseñar y construir una estructura móvil para trabajar con el simulador en varias posiciones y trabajar simultáneamente con numerosas bandejas de erosión y evaluar el equipo funcional y experimentalmente. El simulador de lluvias es un equipo móvil con efecto vibratorio y cinco posiciones; en cada posición hay dos tanques independientes, perforados en el fondo con 180 goteros. Cada perforación genera una gota de 5,8 mm de diámetro promedio. La carga hidráulica por tanque es graduable a través de flotantes. Cada tanque se ajusta independientemente. Un total de 6 bandejas de 30 cm x 50 cm² de superficie y profundidad variable de 10 a 30 cm, pueden ser sometidas a lluvias simultáneamente en cada una de las posiciones que tiene el simulador. Se midieron tres cargas hidráulicas en cada tanque (5, 10 y 15 cm), equivalentes a intensidades teóricas de 43,2; 86,4 y 129,8 mm.h⁻¹ respectivamente. Los resultados señalan que la variabilidad debido al factor bandeja solo resultó significativo para la carga de 5 cm. Las intensidades de lluvia registradas son similares a las teóricas para 5, 10 y 15 cm de carga. Los coeficientes de uniformidad de la precipitación en cada posición resultaron similares para las tres cargas evaluadas.

Palabras claves: Simulador de lluvia gotero, simulador de llu-

via, pérdidas de suelo, erosión.

Abstract

This work has been aimed to build a raindrop simulator that reproduces the effect of wind on a raindrop and to evaluate the rain drop simulator from a functional and experimental stand point. The raindrop simulator is a mobile rig with five possible overhead tank positions and vibratory effect. In each one of these positions there are two independent water tanks with 180 perforations in the under face. The mean diameter of the drop generated is 5.8 mm. The hydraulic head in each tank is adjustable by means of a float ball. Each tank is independently adjustable. A total of 6 trays of 30 x 50 cm² surface by 10 to 30 cm in depth each can be exposed to rain simultaneously in every one of the possible five positions. Three different hydraulic head were tested in each tank, 5, 10 and 15 cm, equivalent to theoretical rain intensities of 43.2, 86.4 and 129.8 mm/h respectively. The experiment results show that the variability due to the tray factor was only significant for a hydraulic head of 5 cm in the overhead water tank. The rain intensities measured were very similar to the ones theoretically calculated for hydraulic head of 5, 10 y 15 cm. The uniformity coefficients for rainfall drop sizes in each position under all hydraulic heads were alike.

Key words: Rain drop simulator, rainfall simulator, soil losses,

INTRODUCCIÓN

En regiones tropicales, es de particular importancia considerar el impacto de las prácticas de manejo agrícola sobre las propiedades del suelo. De allí que se requiera de la formulación de trabajos de investigación orientados a evaluar en forma rápida el comportamiento de los suelos y de los cultivos ante el impacto de lluvias agresivas e intensas como las de las zonas tropicales. Los simuladores de lluvia han sido equipos diseñados con la finalidad de aplicar agua en forma similar a la lluvia natural, bajo condiciones controladas, empleándose para investigar sobre diferentes tipos de erosión de suelos y experimentos hidrológicos (Meyer, 1988). Estos equipos deben reproducir de la lluvia natural (FAO, 1967; Bubenzer, 1979; Meyer, 1979): distribución del tamaño de las gotas de lluvia (uniformidad y aleatoriedad), velocidad de impacto y velocidad terminal, tamaño de gota y energía cinética. De igual manera, las parcelas del ensayo deben ser lo suficientemente largas y anchas para permitir la acción del flujo laminar y una cierta concentración del flujo en surcos, como ocurre en condiciones naturales.

Muchos autores coinciden que a pesar de las limitaciones que generan los simuladores de lluvia, éstos ofrecen resultados a corto plazo a diferencia de los estudios de campo que requieren entre diez y veinte años de seguimiento, por el mantenimiento y cuidados a las parcelas de campo bajo investigación (Mech, 1965; Meyer, 1965; Pla, 1981 y Rodríguez, 1984). Este trabajo pretende hacer una contribución a los estudios en el área de conservación, a través del diseño, construcción y evaluación de un simulador de lluvia tipo gotero con efecto vibratorio.

MATERIALES Y MÉTODOS

La construcción del simulador de lluvias "Tipo Gotero" se realizó en las instalaciones del Departamento e Instituto de Agronomía. Facultad de Agronomía de la Universidad Central de Venezuela, en Maracay, Estado Aragua. El diseño definitivo consta de los sistemas funcional, estructural y complementario, conformados como sigue:

Sistema funcional: Integrado por el mecanismo formador e impulsor de gotas y el dispositivo para colocar las bandejas.

Mecanismo formador e impulsor de gotas: Se diseñó un sistema de depósito de agua, formado por dos tanques iguales, en cuyas paredes inferiores se ubicaron los goteros uniformemente distribuidos y separados a 5 cm, para un área de influencia de 25cm² desde la salida; El diámetro promedio de la gota fue de 5,8mm. La intensidad teórica y la intensidad promedio de cada gotero de sección 25 cm², fue de 0,72 mm.h⁻¹. Esto permitió calcular la intensidad teórica para una bandeja (0,15 m²), la cual fue de 43,2 mm.h⁻¹. Teóricamente se espera

que al duplicar o triplicar la carga, también se incrementaría proporcionalmente la intensidad de lluvia. Esto resulta en valores teóricos de 43,2 ; 86,4 y de 129,6 mm.h⁻¹.

Dispositivo para ubicar las unidades experimentales:

Se diseñó un mesón de losetas prefabricadas de concreto armado sobre pilotines, también de concreto, a modo de columnas. Su finalidad es para servir de soporte a las bandejas de erosión. El mismo está colocado bajo los rieles del eje de desplazamiento del simulador. Se destacó con franjas de colores diferentes las 5 posiciones de seis bandejas cada una.

Sistema estructural: Para la estructura de soporte de los tanques se estimó equivalente a un sistema apertocado de una viga riel con apoyos en los extremos y al centro, lo que da una condición hiperestática; no obstante, puesto que los tanques del simulador solo pueden estar en una única posición a la vez, esta condición puede equivaler a una viga apoyada en un extremo y empotrada al otro. El caso de cargas más crítico sería con todo el simulador cargado transmitiendo el peso al centro de la distancia entre apoyos.

Sistema complementario: Consiste en un mecanismo de movilización, un mecanismo de drenaje y un filtro, los cuales se describen a continuación.

Mecanismo de movilización: Se adaptó un sistema de poleas, guaya y manivela, que permite trasladar manualmente, en forma sencilla, el cuerpo del simulador a las diferentes posiciones.

Mecanismo de drenaje: Tiene como finalidad desviar el agua que no conviene que caiga sobre las bandejas de erosión. Se diseñó un mecanismo de bandejas móviles que sirven para interceptar las gotas y desviar su caudal hacia los lados.

Filtro para sólidos en suspensión: Previendo la presencia de los posibles sedimentos y partículas en suspensión que pudiera venir en el sistema de alimentación de agua, a fin de evitar la obstrucción de los goteros y la presencia de cuerpos extraños en los tanques, se diseñó un mecanismo de malla filtrante para retener o captar sólidos en suspensión.

Evaluación del Simulador

El simulador de lluvias tipo gotero diseñado, fue evaluado desde el punto de vista funcional y desde el punto de vista experimental. Desde el punto de vista funcional, se hizo énfasis en los diferentes sistemas, tratando de detectar fallas y estableciendo los correctivos necesarios para lograr la operatividad y funcionalidad del equipo. En este sentido, se elaboró un Manual operativo y de mantenimiento que permite facilitar el trabajo al operario, asegurar su mantenimiento y mantener la sensibilidad del mismo según las investigaciones a ser conducidas

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados del análisis de varianza anidado para las tres cargas de agua en los tanques del simulador de lluvias, se presentan en el cuadro 1.

Cuadro 1. Resumen de la significación del análisis de varianza anidado (NESTED) obtenido para tres cargas de agua en el simulador de lluvias tipo gotero.

Unidad experimental	Carga 5 cm (44,75 mm.h ⁻¹)	Carga 10 cm (73,75 mm.h ⁻¹)	Carga 15 cm (110,02 mm.h ⁻¹)
Posición	0,96966	0,00012**	0,84449
Tanque	0,43690	0,97799	0,17844
Bandeja	0,00754*	0,05107	0,47530
Fila	0,05067	0,49247	0,29656
Columna	0,00000**	0,00000**	0,00000**

* Significativo para $\alpha=0,05$ ** Significativo para $\alpha=0,01$

Finalmente, en la fase de evaluación del simulador desde el punto de vista experimental, se variaron las cargas de agua en los tanques para las cinco posiciones posibles. Los rangos empleados fueron cinco (5), diez (10) y quince (15) cm de altura, para un lapso de tiempo constante de cinco (5) minutos. Estas cargas, teóricamente reproducirían intensidades de lluvia de 43,2; 86,4 y 129,8 mm.h⁻¹, respectivamente. Para cada una de estas cargas, se recogió el volumen de agua caído por tanque en cada una de las cinco posiciones. Cada tanque surte tres (3) bandejas en forma simultánea en cada posición y en cada bandeja se colocó una matriz de 15 envases : 5 a lo largo (fila) y 3 a lo ancho (columna). En todos los casos las mediciones se hicieron por triplicado.

Este experimento puede considerarse como una estructura anidada, lo cual permitió efectuar, además de las determinaciones tradicionales realizadas en este tipo de evaluaciones (como son el coeficiente de uniformidad y el coeficiente de variación), un análisis aproximado de componentes de varianza (NESTED).

Para cada una de las variables estudiadas, se calcularon estadísticos descriptivos como media, desviación standard de la media, coeficiente de variación, amplitud en los valores o rango y el intervalo de confianza para cada una de las unidades muestreadas.

El intervalo de confianza se calculó, mediante la relación:

$$P (x - t\alpha/2 (n-1) \delta/\sqrt{n} < U < x + t\alpha/2 (n-1) \delta/\sqrt{n}) = 1-\alpha$$

Donde: \bar{x} = media

t = valor de t para α

n = numero de observaciones

δ = desviación standard de la media

Los resultados se expresaron de acuerdo a la expresión:

$$IC (1-\alpha) = [LS;LI]$$

donde: IC = intervalo de confianza

LS = límite superior

LI = límite inferior

El coeficiente de variación se calculó mediante el procedimiento univariado del SAS.

Para determinar la uniformidad en la distribución de la lluvia, se utilizó la expresión empleada por Morín (1967) y Rodríguez (1985):

$$CU = [1 - \sum [X_i - \bar{X}] / \sum X_i] * 100$$

donde: CU = coeficiente de uniformidad

X_i = precipitación en cada envase

\bar{X} = media de la precipitación en 15 envases

Se aprecia cómo la variabilidad debido al factor bandeja sólo resultó significativa para la carga de 5 cm. De igual manera, la posición del simulador arrojó diferencias altamente significativas cuando se mantuvo una carga de 10 cm en el interior de los tanques; mientras que el factor columna (ancho de la bandeja) presentó niveles altamente significativos independientemente de la carga considerada.

En el primer caso, las diferencias encontradas entre bandejas para la carga más baja, pudiera explicarse bajo la premisa que la carga de agua que soporta un gotero debe afectar la energía potencial y la cantidad de gotas que salen por el mismo. Si a esto se suma el hecho de que esta carga es sometida a un movimiento vibratorio del simulador, es de esperarse una mayor influencia cuando se emplean cargas pequeñas. Mientras mayor sea la lámina de agua en el tanque, mayor será la resistencia ofrecida al movimiento de agua y por ende, a la variación de la carga hidráulica que soportan los goteros.

Las diferencias encontradas entre posiciones cuando la carga es de 10 cm, no parecen responder a un patrón lógico, ya que a cargas mayores o menores no se evidencian tales diferencias. Por otra parte, es de esperarse que mientras mayor sea la unidad evaluada, menor debería ser la variabilidad.

Cuando se analiza la distribución de agua entre la bandeja, específicamente para columna (ancho de bandeja), resulta lógico que las diferencias sean marcadas, toda vez que la misma está conformada por tres sub unidades (envases), mientras que la fila (largo de la bandeja), la conforman 5 sub unidades. Estos resultados coinciden con otros investigadores que han encontrado mayor variabilidad a medida que se reduce la unidad experimental.

1. Variabilidad de las intensidades de lluvia para tres cargas en el simulador de lluvia tipo gotero: Los coeficientes de variación de la lluvia simulada sobre bandejas, para las cargas evaluadas son en general bajos. Este coeficiente

resulta mayor para la carga de 10 cm, debido a las diferencias entre posiciones detectadas en el análisis de varianza. Además, las cargas de 5, 10 y 15 cm en los tanques del simulador, permiten reproducir intensidades de lluvia contrastantes, lo cual satisface las expectativas previstas. El intervalo de confianza para los tres casos es relativamente estrecho, si se compara con la variación de la lluvia natural.

2. Variabilidad de los coeficientes de variación: El análisis de los coeficientes de variación de la precipitación para las tres cargas seleccionadas, cuando se utiliza la bandeja como unidad experimental arrojó una media de 41,13; 41,39 y 44,44, para las cargas de 5, 10 y 15 cm, respectivamente. Los resultados demuestran que a nivel de bandeja, la carga hidráulica no introduce un efecto determinante de variabilidad en los datos. Esto se evidencia al comparar las medias de los coeficientes de variación, donde la variabilidad es similar para cualquiera de las cargas utilizadas. El comportamiento obtenido para el efecto tanque, resultó muy similar al obtenido para el efecto bandeja (media de coeficiente de variación de 43,24; 42,49 y 46,93 para las cargas de 5, 10 y 15 cm, respectivamente). Esto se puede apreciar al comparar los intervalos de confianza para las cargas 5 y 10 cm. De igual manera, la carga de 15 cm, parece incrementar la variabilidad.

Cuando se relacionan los valores obtenidos para los efectos tanque y bandeja, se observa que la variabilidad entre bandejas es menor que la obtenida para tanques, lo cual resulta lógico ya que los valores obtenidos provienen de promedios de los coeficientes de variación de unidades más pequeñas. Es de esperarse entonces, que a medida que la unidad experimental sea mayor, mayor será la variabilidad de los coeficientes de variación, debido a que aumenta el número de coeficientes procesados, desde el envase hasta el tanque.

A pesar de la ligera diferencia entre el tanque y la bandeja, se encuentra similitud en la variabilidad para todas las cargas. Esto permite afirmar que los tanques del simulador de lluvias no adicionan fuentes de variabilidad a los resultados obtenidos, pudiéndose emplear en ensayos indistintamente es-

tas dos unidades experimentales. Por otra parte, la similitud en los valores obtenidos parece indicar que el tanque fue menos variable que la bandeja. Esto coincide con los resultados obtenidos por Rodríguez (1984), quien observó mayor uniformidad en la precipitación, en la medida que el área muestreada se incrementaba.

3. Uniformidad de la intensidad de la lluvia para las tres cargas en el simulador de lluvias tipo gotero: El análisis de varianza de los coeficientes de uniformidad de la lluvia en bandeja para las tres cargas seleccionadas arrojó diferencias significativas para el factor “tanque” en la carga de 5 cm y altamente significativas para la carga de 15 cm. El factor “posición” no resultó significativo. Estos resultados muestran la uniformidad de la precipitación en las diferentes posiciones del simulador, para las tres cargas evaluadas. Puede decirse que la uniformidad en las diferentes posiciones es similar, lo que implica un patrón de distribución homogéneo. En general, el valor medio del coeficiente de uniformidad varía entre 66 y 70, lo cual se puede considerar un valor satisfactorio, si se considera que en los simuladores tipo gotero la expulsión de la gota es debido a su carga hidráulica y en general a la gravedad. Es decir, la gota formada parte de una energía cinética igual a cero, siendo la carga hidráulica variable por el efecto vibratorio que posee el simulador. Por otra parte, este simulador permite trabajar con un importante número de muestras en forma simultánea, por lo que la confiabilidad en los datos puede ser mayor al aumentar el número de repeticiones.

Rodríguez y Rodríguez (1984) obtuvieron un valor de coeficiente de uniformidad de 75,94 para una intensidad de lluvia cercana a 60 mm/h con un simulador tipo boquilla adaptado por ellos, mientras que Morín (1967) obtuvo un valor similar para un simulador del mismo tipo.

4.4 Determinación del índice de erosividad de la lluvia: En el cuadro 2, se presenta el índice de erosividad de la lluvia aplicada, para las tres intensidades evaluadas. Puede apreciarse cómo se incrementa el índice de erosividad, cuando se aumenta la carga desde 5 cm hasta 15 cm.

Cuadro 2. Índice de erosividad de la lluvia (EI_{30}), para tres cargas de agua en el simulador de lluvia tipo gotero, para un diámetro de gota promedio de 5,8 mm y 2,5 m de altura de caída libre.

Masa de una gota (g)	Area de 180 goteros (cm ²)	V. Final (cm.s ⁻¹)	E.C. Gota (Mj)	E.C. lluvia (Mj.ha ⁻¹)	I_{30} (mm.h ⁻¹)	EI_{30} (Mj.mm.ha ⁻¹ .h ⁻¹)	Carga (cm)
					44,75	70,53	5
0,1021	4.500	700	$2,5 \cdot 10^{-9}$	1.576	73,95	116,54	10
					110,02	173,39	15

E.C.: Energía cinética.

CONCLUSIONES

El simulador de lluvias construido resulta versátil porque permite trabajar con un importante número de muestras,

pendientes, intensidades de lluvia y repeticiones en forma simultánea.

La lluvia obtenida para las diferentes posiciones, tanques y cargas del simulador, tiene un patrón de distribución homogéneo y un coeficiente de uniformidad satisfactorio, por lo que su utilización en ensayos de productividad y conservación a nivel de invernadero, se considera válido.

AGRADECIMIENTO

Se agradece al Consejo de Desarrollo Científico y Humanístico (CDCH) y al Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Tecnológicas (CONICIT), por el financiamiento otorgado para la realización de este trabajo.

LITERATURA CITADA

- Bubbenzer, G.** 1979. Rainfall characteristics important for simulation. *In*: Proceeding of the rainfall simulator workshop. Tucson, Arizona. Department of agriculture science and education administration agricultural reviews and manuals. ARM-W-10. July 1979. pp 22-35.
- FAO.** 1967. La erosión del suelo por el agua. Algunas medidas para combatirla en las tierras de cultivo. Colección FAO: Fomento de Tierras y Aguas No. 7. FAO: Cuadernos de fomento agropecuario No. 81. Roma.
- Mech, S.** 1965. Limitations of simulated rainfall as a research tool. Transactions of the ASAE 8(1).
- Meyer, L.** 1965. Simulation of rainfall for soil erosion research. Transactions of ASAE 8(1): 63-65
- Morín, J.** 1967. Un simulador de lluvia con disco rotatorio. Transactions of the ASAE. 10: 77-79.
- Pla, I.** 1981. Simuladores de lluvia para el estudio de las relaciones suelo-agua bajo agricultura de secano en los Trópicos. Rev. Facultad de Agronomía. Maracay, Venezuela. XII(1-2): 81-93.
- Rodríguez, O. y O. E., Rodríguez.** 1984. Adaptación de un simulador de lluvia para investigación en conservación de suelos. Rev. Fac. Agron. (Maracay). Alcance 37: 103-112.
- Rodríguez, O.** 1985. Efecto de la labranza y de los residuos en superficie sobre el proceso de erosión hídrica y las pérdidas de agua por escorrentía en tres suelos agrícolas de Venezuela. Tesis de Maestría. Maracay, Venezuela. UCV. Facultad de Agronomía. Postgrado en Ciencia del Suelo. 117 p.