

BOLETIM TÉCNICO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE LAVRAS
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIA DO SOLO

CALIBRAÇÃO E USO DE
MINISSIMULADOR DE CHUVA
PARA ESTUDOS DE EROSÃO E
POLUIÇÃO DO SOLO

Boletim Técnico - n.º 77 - p. 1-17

Lavras/MG

GOVERNO DO BRASIL

**MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE LAVRAS**

MINISTRO: Fernando Haddad

REITOR: Antonio Nazareno Guimarães Mendes

VICE-REITOR: Ricardo Pereira Reis

Diretoria Executiva: Marco Antônio Rezende Alvarenga (Diretor), Elias Tadeu Fialho e Renato Paiva

Conselho Editorial: Marco Antônio Rezende Alvarenga (Presidente), Amauri Alves de Alvarenga, Carlos Alberto Silva, Elias Tadeu Fialho, Luiz Carlos de Oliveira Lima e Renato Paiva

Comissão Editorial: Mozart Martins Ferreira e Marco Aurélio Vitorino Ribeiro

Secretária: Glenda Fernanda Morton

Referências Bibliográficas: Vânia Natal de Oliveira

Revisão de Texto: Paulo Roberto Ribeiro

Editoração Eletrônica: Luciana Carvalho Costa, Alézia C. M. Ribeiro, Christyane A. Caetano

Impressão: Gráfica/UFLA

Marketing e Comercialização: Bruna de Carvalho Naves



ENDEREÇO PARA CORRESPONDÊNCIA:

EDITORA UFLA - Caixa Postal 3037 - 37200-000 - Lavras, MG.

Telefax: (35) 3829-1532 Fone: (35) 3829-1115

E-mail: editora@ufla.br

SUMÁRIO

| | |
|--|-----------|
| 1. INTRODUÇÃO | 5 |
| 2. DESCRIÇÃO DO SIMULADOR | 6 |
| 2.1. Material necessário | 6 |
| 2.2. Descrição | 6 |
| 3. PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO | 7 |
| 4. UTILIZAÇÃO DO SIMULADOR | 8 |
| 5. CARACTERIZAÇÃO DA CHUVA SIMULADA | 8 |
| 5.1. Determinação do tamanho da gota | 8 |
| 5.2. Altura de queda | 9 |
| 5.3. Tempo de queda e velocidade terminal das gotas | 9 |
| 5.4. Intensidade da chuva simulada | 11 |
| 5.5. Energia cinética da chuva simulada | 12 |
| 6. CONSIDERAÇÕES FINAIS | 15 |
| 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 16 |

CALIBRAÇÃO E USO DE MINISSIMULADOR DE CHUVA PARA ESTUDOS DE EROÇÃO E POLUIÇÃO DO SOLO

Bruno Teixeira Ribeiro¹

Ciro Augusto de Souza Magalhães²

José Maria de Lima³

Marx Leandro Naves Silva³

1. INTRODUÇÃO

Muitos pesquisadores têm utilizado simuladores de chuva em estudos de perdas de solo, água e nutrientes, formação do encrostamento, infiltração de água e lixiviação de compostos ou metais em solos. A principal vantagem de sua utilização é o controle que se pode ter sobre as características da chuva, como diâmetro e distribuição das gotas, altura e tempo de queda, velocidade terminal, tempo de duração, intensidade e energia cinética, o que não é possível em condições de chuvas naturais. Além disso, vários eventos de chuva de diferentes intensidades e energia cinética podem ser produzidos e reproduzidos a qualquer tempo.

Vários tipos de simuladores têm sido propostos, podendo ser de grande ou pequeno porte, pressurizados ou não e, alguns, totalmente automatizados. Os simuladores de grande porte requerem enorme aparato, mão-de-obra e algumas complicações quanto ao seu abastecimento de água e transporte, tornando-os, muitas vezes, pouco práticos.

Neste boletim, é apresentado um minissimulador de chuva adaptado do simulador de chuva tipo Goettingen, introduzido em 1984 no Instituto Agrônomo do Paraná – IAPAR, em convênio com a Universidade de Goettingen e Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit – GTZ, na Alemanha, para estudos de erosão hídrica em diversos sistemas e manejo do solo (Roth, 1984; Roth et al., 1985). Aspectos relacionados com a construção do minissimulador de chuva, caracterização da chuva simulada e o potencial de uso são apresentados.

¹Engenheiro Agrônomo, doutorando do Departamento de Ciência do Solo da Universidade Federal de Lavras/UFLA – Cx. P. 3037 – 37200-000 – Lavras, MG – ribeiro.bt@gmail.com

²Engenheiro Agrícola, mestrando do Departamento de Ciência do Solo da Universidade Federal de Lavras/UFLA – Cx. P. 3037 – 37200-000 – Lavras, MG – ciromagalhaes@gmail.com

³Professor do Departamento de Ciência do Solo da Universidade Federal de Lavras/ UFLA – Cx. P. 3037 – Lavras, MG – jmlima@ufla.br, marx@ufla.br

2. DESCRIÇÃO DO SIMULADOR

O minissimulador de chuvas é o modelo adotado por Roth (1984) e foi construído no Laboratório de Conservação do Solo e Água do Departamento de Ciência do Solo da Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.

2.1. Material necessário

- Barras de metalon para a estrutura do simulador;
- Dois reservatórios em aço inox;
- Agulhas hipodérmicas;
- Materiais hidráulicos (tubos de PVC de ½ polegada; 1 registro do tipo esfera de ½ polegada; tampões de PVC de ¾ e ½ polegada; adaptadores de PVC de ½ polegada; mangueira transparente do tipo “cristal” de ½ polegada; joelhos de PVC de ½ polegada);
- Chapas em aço galvanizado para construção das miniparcelas de perda de solo.

2.2. Descrição

O simulador consiste de um reservatório de aço inox de dimensões de 0,88 m de comprimento, 0,88 m de largura e 0,2 m de altura, montado sobre uma torre de 3 m construída em metal (Figura 1). Essa torre pode ser desmontada na altura de 1,23 m, para facilitar o seu transporte. O fundo desse reservatório apresenta 1849 furos de 0,5 mm de diâmetro, dispostos em uma malha quadrada, espaçados 1,5 cm um do outro. Em cada um desses furos, foi inserida uma agulha hipodérmica da marca Nipro (20 x 5,5), sendo esse o dispositivo responsável pela formação das gotas; esse é o reservatório formador de gotas. Esse reservatório é interligado a um outro reservatório de dimensões de 0,60 m de comprimento, 0,60 m de largura e 0,20 m de altura, com capacidade 72 litros de água, também em aço inox posicionado no topo da torre, estabelecendo-se um sistema de vasos comunicantes (sistema de Mariotte).

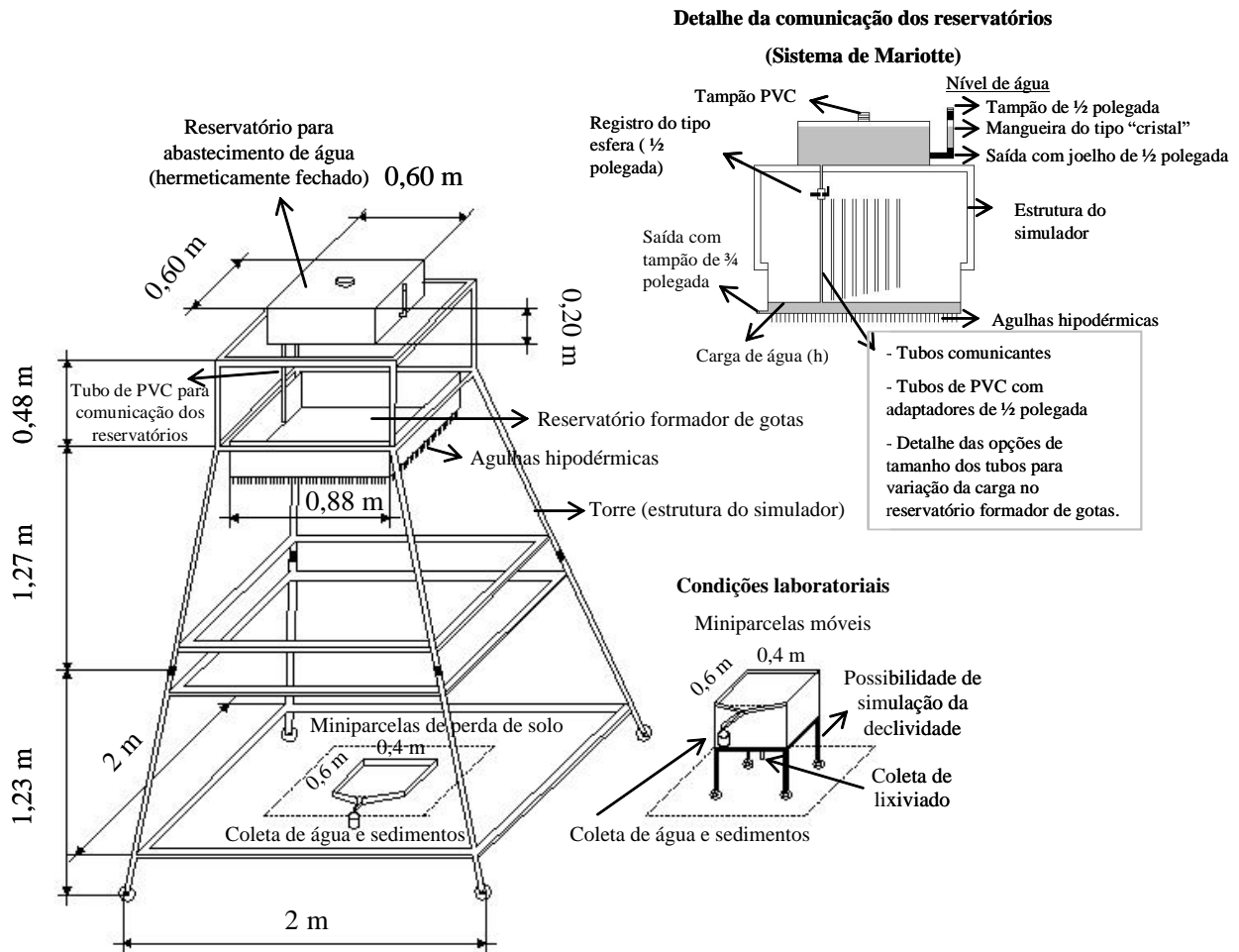


FIGURA 1 – Descrição da construção e princípio de funcionamento do simulador de chuva.

3. PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO

O princípio de funcionamento do simulador de chuva é o de vasos comunicantes (sistema de Mariotte). Para isso, o reservatório posicionado na parte mais alta da torre deve ser hermeticamente fechado (Figura 1). Na sua parte superior, há uma abertura por onde se faz o abastecimento de água, devendo estar fechada por um tampão durante as operações de uso do simulador. Na lateral do reservatório de abastecimento, há um nível para acompanhamento da quantidade de água. Na extremidade inferior, tem-se um registro do tipo esfera de 1/2 polegada e, conectado a esse, um tubo de PVC de 1/2 polegada, que abastece o reservatório formador de

gotas. Durante a formação de chuvas, há necessidade de manutenção de uma carga de água (altura de água) constante dentro do reservatório formador de gotas. Para isso, os tubos de PVC que abastecem o reservatório podem ser seccionados em diferentes tamanhos, de forma que, após sua conexão ao registro, à distância (h) entre a sua extremidade e o fundo do reservatório corresponda à carga de água desejada.

Definida a carga de água no reservatório formador de gotas, abastece-se totalmente o reservatório superior, mantendo-se o registro fechado. Em seguida, após a conexão do respectivo tubo de PVC ao registro, abastece-se o reservatório formador de gotas, até que a água ultrapasse poucos milímetros da extremidade do tubo e, imediatamente, abre-se o registro. Estabelece-se, então, o sistema de vasos comunicantes. Nessa condição, à medida que a água no reservatório formador de gotas atingir a extremidade do tubo, ocorre à entrada de ar por ele e a reposição de água, mantendo-se uma carga constante.

4. UTILIZAÇÃO DO SIMULADOR

O simulador de chuva pode ser utilizado em condições de campo e de laboratório. No primeiro caso, podem ser montadas miniparcels de perda de solo (0,60 x 0,40 m) em chapas de aço galvanizado, como aquelas sugeridas e apresentadas na Figura 1, o que possibilita o estudo de diferentes classes de solo, coberturas vegetais, sistemas de manejo, entre outros. Nessas condições, poderão ser simuladas chuvas de diferentes intensidades, a qualquer tempo, e se avaliarem as perdas de solo, água, nutrientes, transporte de metais pesados ou pesticidas, por meio de sedimentos de erosão.

Em condições laboratoriais, podem ser construídas miniparcels móveis (Figura 1) contendo amostras de solo, onde, além da avaliação de perdas de solo, água e nutrientes em diferentes eventos de chuva, poderão ser também coletadas amostras de lixiviados, para avaliação do movimento de nutrientes, metais pesados e pesticidas.

5. CARACTERIZAÇÃO DA CHUVA SIMULADA

5.1. Determinação do tamanho da gota

Para determinação do tamanho médio de gotas, obtém-se a massa de 100 gotas, coletadas em um determinado intervalo de tempo. Considerando a densidade

da água igual a 1g cm^{-3} , obtém-se o volume médio das gotas. Considerando-se a gota como uma esfera perfeita, seu diâmetro pode ser obtido pela equação 1; neste estudo, o valor foi de 2,45 mm. O tamanho das gotas é variável com o tipo e tamanho da agulha utilizada. Portanto, outros tipos de agulhas podem ser utilizados, caso se deseje gotas de maior ou menor tamanho. Independentemente da agulha escolhida, essa deve permitir que a gota se forme gradativamente na sua extremidade e caia, tendo uma velocidade inicial igual a zero.

$$V = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot R^3 \quad (1)$$

V - volume da gota (cm^3)

R - raio da gota (cm)

5.2. Altura de queda

A altura de queda das gotas corresponde à distância entre as extremidades das agulhas e a superfície do solo, nas parcelas de campo ou em laboratório.

5.3. Tempo de queda e velocidade terminal das gotas

O tempo de queda e a velocidade terminal das gotas (velocidade no momento do impacto das gotas com a superfície do solo) podem ser estimados pelas equações 2 e 3, propostas por Lima et al. (1993).

$$T = \arccos[\exp(Z \cdot C)] \cdot (g \cdot C)^{-1/2} \quad (2)$$

$$V = \left(\frac{g}{C}\right)^{1/2} \cdot \tan\left[T(g \cdot C)^{1/2}\right] \quad (3)$$

T - tempo de queda da gota (s)

Z - altura de queda da gota (m)

C - coeficiente de atrito com o ar (adimensional)

g - aceleração da gravidade ($9,81\text{ m s}^{-2}$)

V - velocidade de impacto das gotas ao tocar a superfície do solo (m s^{-1})

O coeficiente de atrito com o ar (C) pode ser calculado pela equação 4, segundo Hills (1988), citado por Silva et al. (1995).

$$C = \frac{(0,804 - 0,264D + 0,066D^2 - 0,004D^3)}{1,109D} \quad (4)$$

C - coeficiente de atrito com o ar (adimensional)

D - diâmetro da gota (mm)

Na Figura 2, é mostrado o efeito da altura de queda e do diâmetro da gota na sua velocidade terminal, com base nas equações propostas por Lima et al. (1993). A velocidade aumenta com o diâmetro da gota e atinge um valor constante a partir de determinada altura, sendo essa a velocidade terminal. Nas condições desse simulador, as gotas produzidas (2,45 mm de diâmetro), caindo de uma altura de 2,26 m, apresentam uma velocidade de impacto com a superfície do solo de 5,5 m s⁻¹. A altura não foi suficiente para que as gotas, nesse diâmetro, atingissem a velocidade terminal.

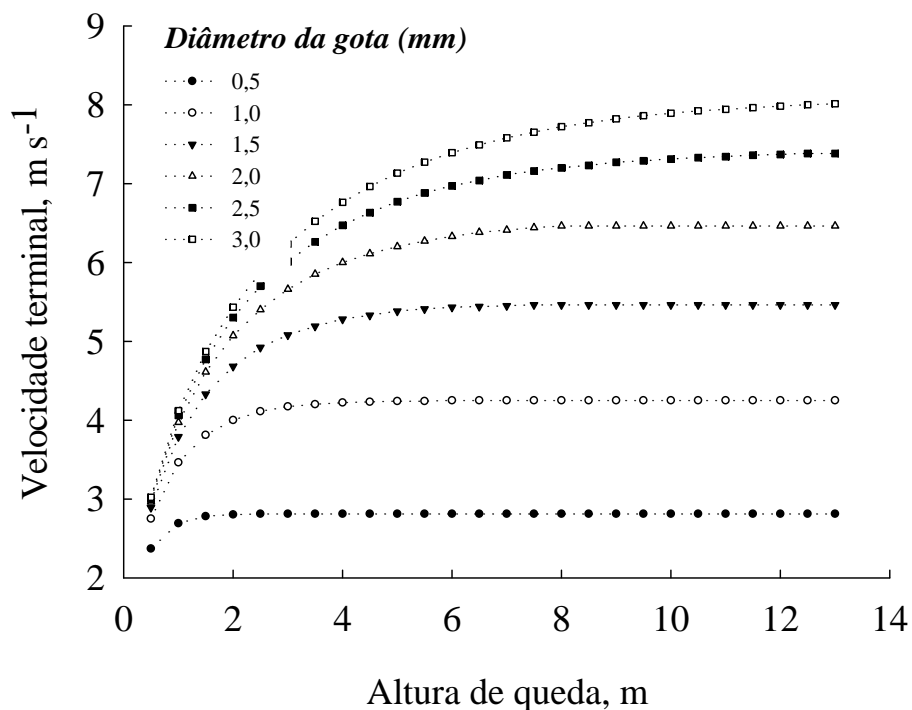


FIGURA 2 – Efeito da altura de queda e do diâmetro na velocidade da gota.

5.4. Intensidade da chuva simulada

Diferentes intensidades da chuva simulada podem ser obtidas variando a carga de água (altura da água) no reservatório formador de gotas. Na figura 3, é apresentada a variação da intensidade da chuva simulada em função da carga de água no reservatório formador de gotas. A intensidade pode ser medida recolhendo-se um determinado volume de água em um dado intervalo de tempo (equação 5) em recipientes com área de recebimento conhecida (pluviômetros) colocados na superfície do solo na projeção da chuva simulada.

$$I = \left[\frac{V/S}{t} \right] \cdot 60 \quad (5)$$

I - intensidade da chuva (mm h^{-1})

V - volume de água coletado (l)

S - área da seção do recipiente de coleta (m^2)

t - tempo de coleta (minutos)

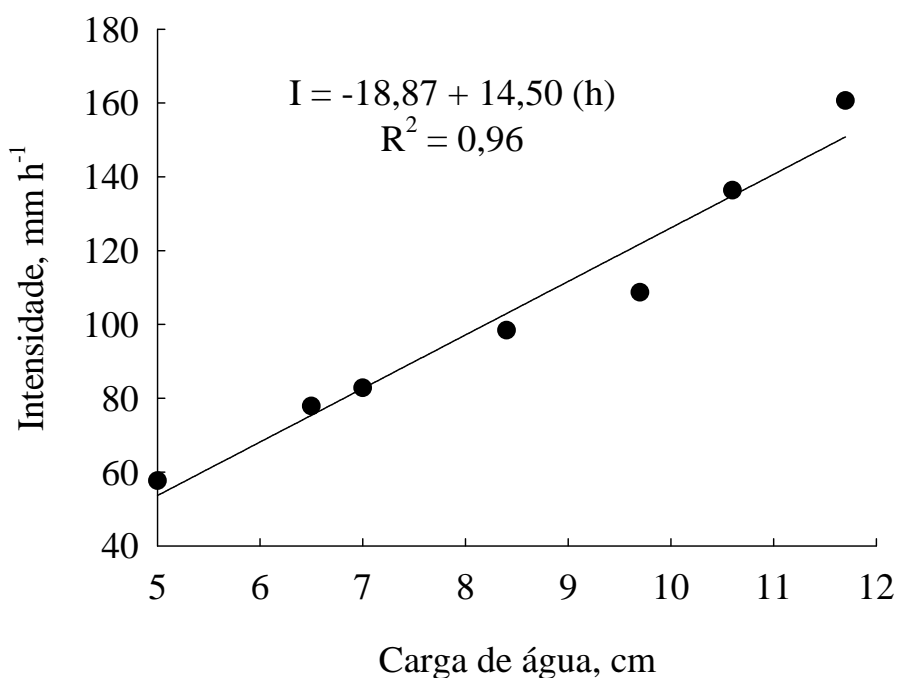


FIGURA 3 – Variação da intensidade da chuva simulada (I) em função da carga de água (h) no reservatório formador de gotas.

5.5. Energia cinética da chuva simulada

A energia cinética da chuva simulada pode ser estimada com base na sua intensidade, por meio do modelo proposto por Wischmeier & Smith (1958) e modificado para o Sistema Internacional de Unidades por Foster et al. (1981) (equação 6). Wagner & Massambani (1988), após um estudo dos padrões de chuva na região de São Paulo, também propuseram um modelo para estimativa da energia cinética da chuva em função da sua intensidade (equação 7) que, segundo os autores, não diferiu significativamente daquele proposto por Wischmeier & Smith (1958).

$$EC = 0,119 + 0,0873 \log I \quad (6)$$

$$EC = 0,153 + 0,0645 \log I \quad (7)$$

EC – energia cinética da chuva ($\text{MJ ha}^{-1} \text{mm}^{-1}$)

I – intensidade da chuva (mm h^{-1})

Quando são conhecidas a velocidade e a massa das gotas de chuva, a energia cinética pode ser calculada (equação 8), tendo como base o somatório da energia cinética de todas as gotas que chegam à superfície do solo.

$$Ec = \frac{m \cdot v^2}{2} \quad (8)$$

Ec - energia cinética da gota ao tocar a superfície do solo (J)

m - massa de cada gota (kg)

v - velocidade da gota ao tocar a superfície do solo (m s^{-1})

Nesse caso, o cálculo da energia cinética pode fornecer resultados mais confiáveis do que aqueles obtidos por meio dos modelos propostos por Wischmeier & Smith (1958) e Wagner & Massambani (1988). Esses modelos podem superestimar a energia cinética, por terem sido obtidos para condições naturais, com o pressuposto de que a velocidade terminal das gotas foi atingida, o que, na maioria das vezes, não acontece quando se trabalha com chuva simulada. Na figura 4, são apresentados os valores de energia cinética estimados por esses modelos e também calculados para uma chuva simulada com intensidade de 150 mm h^{-1} , durante 5, 8,

11, 16 e 21 minutos (Ribeiro, 2006). A energia cinética correspondeu a 61% e 64% daquela estimada pelos modelos de Wischmeier & Smith (1958) e Wagner & Massambani (1988), respectivamente. Amorim et al. (2001), também trabalhando com chuva simulada, encontraram que a energia cinética calculada foi, em média, 68% daquela estimada por tais modelos.

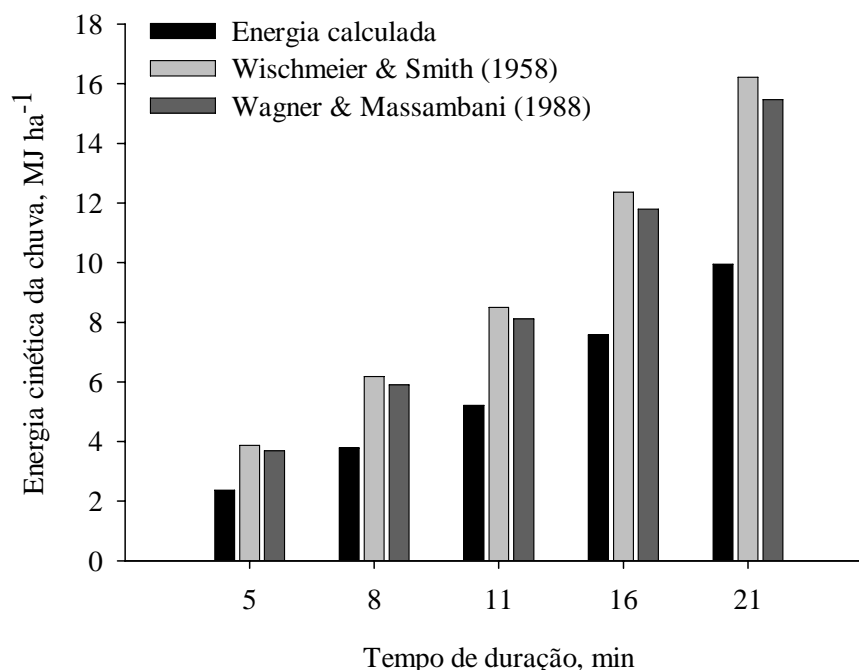


FIGURA 4 – Energia cinética calculada e estimada pelos modelos propostos por Wischmeier & Smith (1958) e Wagner & Massambani (1988) para uma chuva simulada com intensidade de 150 mm h⁻¹. Fonte: Ribeiro (2006).

A seguir, é apresentada uma descrição detalhada dos cálculos da energia cinética da chuva simulada com base nas características do simulador e da chuva aqui apresentados, podendo ser extrapolado para diversas situações.

- Com base no volume de cada gota determinado pela equação 1, conforme descrição no item 5.1, e considerando a densidade da água 1 g cm⁻³, tem-se a massa de cada gota. Nesse caso, as agulhas hipodérmicas escolhidas produzem gotas de 0,0077 g ($7,7 \cdot 10^{-6}$ kg).

- A altura de queda é de 2,26 m, medida diretamente no local com uso de uma trena, desde a extremidade da agulha até a superfície do solo (Figura 1).

- O coeficiente de atrito com o ar (C) é de 0,1820, obtido pela equação 4, em função do diâmetro das gotas (2,45 mm).

- O tempo de queda é de 0,72 s, obtido pela equação 2, e a velocidade das gotas ao tocar a superfície do solo (equação 3) é de 5,5 m s⁻¹. Assim, nesse caso, não se pode chamar de velocidade terminal, uma vez que, para o diâmetro de gotas produzidas e a altura de queda, essa não foi atingida (Figura 2).

- Considerando a massa de cada gota e sua velocidade ao tocar a superfície do solo, encontra-se a energia cinética de cada gota (equação 8).

- Considerando uma chuva de intensidade de 60 mm h⁻¹ (carga de água = 5,4 cm - conforme figura 3) durante 30 minutos e delimitando-se a área de influência do simulador como sendo a área das miniparcels (0,40 x 0,6 m), tem-se que:

- 1 mm = 1 l m⁻², logo:

$$60 \text{ mm} = 60 \text{ l m}^{-2}$$

$$60 \text{ mm h}^{-1} = 60 \text{ l m}^{-2} \text{ em 1 hora ou} \\ 30 \text{ l m}^{-2} \text{ em 30 minutos}$$

- Miniparcels (0,40 m x 0,60 m)

$$\text{Área} = 0,24 \text{ m}^2$$

- 30 l → 1 m²

$$x \rightarrow 0,24 \text{ m}^2$$

$$x = 7,2 \text{ l de água que as parcelas receberam durante os 30 minutos}$$

- Volume de água = 7,2 l

- Volume de 1 gota = 7,7.10⁻⁶ l

- N° gotas = Volume total de água ÷ Volume de 1 gota

$$\text{- N° gotas} = 7,2 \text{ l} \div 7,7 \cdot 10^{-6} \text{ l} = 9,35 \cdot 10^5 \text{ gotas}$$

As miniparcels receberam 9,35.10⁵ gotas em 30 minutos

$$\text{- Ec(gota)} = \frac{m \cdot v^2}{2}$$

$$\text{- Ec(gota)} = \frac{7,7 \cdot 10^{-6} \cdot 5,5^2}{2} = 1,16361 \cdot 10^{-4} \text{ J}$$

- Ec total = Ec gota . n° gotas

$$= 1,16361 \cdot 10^{-4} \text{ J} \cdot 9,35 \cdot 10^5$$

$$= 108,8 \text{ J}$$

- Relacionado com a área das miniparcels, tem-se que:

$$108,8 \text{ J} \rightarrow 0,24 \text{ m}^2$$

$$x \rightarrow 1 \text{ m}^2$$

$$x = 453,33 \text{ J m}^{-2}$$

$$453,33 \text{ J} \rightarrow 1 \text{ m}^2$$

$$x \rightarrow 10.000 \text{ m}^2 (1 \text{ ha})$$

$$x = 4,53 \cdot 10^6 \text{ J ha}^{-1} = \mathbf{4,53 \text{ MJ ha}^{-1}}$$

- Se for estimar a energia cinética da chuva em função de sua intensidade por meio dos modelos, tem-se que:

Wischmeier & Smith (1958)

- Intensidade = 60 mm h^{-1}

$$EC = 0,119 + 0,0873 \log I$$

$$EC = 0,119 + 0,0873 \log (60)$$

$$EC = 0,274 \text{ MJ ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$$

- Considerando a lâmina no período de 30 minutos = 30 mm, tem-se que:

$$EC = 0,274 \cdot 30 = \mathbf{8,22 \text{ MJ ha}^{-1}}$$

Wagner & Massambani (1988)

- Intensidade = 60 mm h^{-1}

$$EC = 0,153 + 0,0645 \log I$$

$$EC = 0,153 + 0,0645 \log (60)$$

$$EC = 0,267 \text{ MJ ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$$

- Considerando a lâmina no período de 30 minutos = 30 mm, tem-se que:

$$EC = 0,267 \cdot 30 = \mathbf{8,01 \text{ MJ ha}^{-1}}$$

- A energia cinética calculada correspondeu a 55% e 57% daquelas estimadas pelos modelos propostos por Wischmeier & Smith (1958) e Wagner & Massambani (1988), respectivamente.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O minissimulador de chuva apresentado é de construção prática e de baixo custo. O equipamento pode ser utilizado com eficiência tanto em condições de campo quanto de laboratório, para a estimativa de perdas de solo e geração de

modelos de perdas de solo, água e nutrientes, em estudos de infiltração de água no solo, encrostamento e também em estudos de contaminação ambiental, como o transporte de metais pesados e pesticidas, via sedimentos de erosão e por lixiviação.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMORIM, R. S. S.; SILVA, D. D.; PRUSKI, F. F.; MATOS, A. T. Influência da declividade do solo e da energia cinética de chuvas simuladas no processo de erosão entre sulcos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 5, n. 1, p. 124-130, jan./abr. 2001.

FOSTER, G. R.; McCOOL, D. K.; RENARD, K. G.; MOLDENHAUER, W. C. Conversion of the universal soil loss equation to SI units. **Journal of Soil and Water Conservation**, Ankeny, v. 36, n. 6, p. 355-359, 1981.

LIMA, L. A.; SILVA, M. L. N.; CURI, N.; MARQUES, J. J. G. S. M. O salpicamento de latossolos provocado por gotas de chuva. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 24., 1993, Goiânia. **Resumos Expandidos...** Goiânia: SBCS, 1993. v.3, p.161-162.

RIBEIRO, B. T. **Energia cinética de gotas de chuva simulada e energia ultra-sônica na desagregação de um Cambissolo**. 2006. 65 p. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.

ROTH, C. H. **Relatório sobre o desenvolvimento de um simulador de chuvas tipo Goettingen modificado e melhorado**. Londrina, PR: Acordo Brasil-Alemanha/Convênio IAPAR/GTZ/Universidade de Goettingen, 1984. 12 p. (Relatório).

ROTH, C. H.; MEYER, B.; FREDE, H. G. A portable rainfall simulator to study factors affecting runoff, infiltration and soil loss. **Catena**, v. 12, p. 79-85, 1985.

SILVA, M. L. N.; CURI, N.; MARQUES, J. J. G. S. M.; LIMA, L. A.; FERREIRA, M. M.; LIMA, J. M. Resistência ao salpico provocado por impacto de gotas de chuva simulada em Latossolos e sua relação com características químicas e mineralógicas. **Ciência e Prática**, Lavras, v. 19, n. 2, p. 176-182, abr./jun. 1995.

WAGNER, C. S.; MASSAMBANI, O. Análise da relação intensidade de chuva-energia cinética de Wischmeier & Smith e sua aplicabilidade à região de São Paulo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 12, n. 3, p. 197-203, set./dez. 1988.

WISCHMEIER, W. H.; SMITH, D. D. Rainfall energy and its relationships to soil loss. **Transactions of the American Geophysical Union**, Washington, v. 39, n. 2, p. 285-291, 1958.
