

SEÇÃO VI - MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO E DA ÁGUA

PARÂMETROS EROSIVIDADE DA CHUVA, DA ENXURRADA E DA CHUVA-ENXURRADA CORRELACIONADOS COM AS PERDAS DE SOLO DE UM LUVISSOLO⁽¹⁾

A. W. ALBUQUERQUE⁽²⁾, F. LOMBARDI NETO⁽³⁾, A. CATANEO⁽⁴⁾,
V. S. SRINIVASAN⁽⁵⁾ & J. R. SANTOS⁽²⁾

RESUMO

Foram estudadas as correlações lineares simples, múltiplas e não-lineares entre os parâmetros erosividade da chuva, da enxurrada e da chuva-enxurrada e as perdas de solo provocadas por chuvas erosivas num Luvissole. Os dados correspondentes ao período de 1986-1990 foram obtidos na estação experimental de Sumé (PB), pertencente à Universidade Federal da Paraíba - UFPB. Para determinar os parâmetros erosividade da chuva, da enxurrada e da chuva-enxurrada, foram analisadas chuvas individuais registradas em 136 pluviogramas. O volume de enxurrada isolado ou em combinação com características da chuva contribuiu, de forma significativa, para melhorar a estimativa das perdas de solo de chuvas individuais. Os parâmetros erosividade da chuva-enxurrada $a(V_u \propto I_{30})^b$; $a(V_u \propto I_5)^b$; $a(EIA)^b$ e da enxurrada $a(V_u)^b$ foram os melhores estimadores das perdas de solo para chuvas individuais. Dentre os parâmetros da erosividade da chuva, os que melhor se correlacionaram com as perdas de solo foram aqueles que incluíram o produto do volume da chuva pela intensidade máxima em trinta minutos $a(V_r I_{30})$.

Termo de indexação: erosão, semi-árido, modelo.

-
- ⁽¹⁾ Parte da Tese de Doutorado do primeiro autor, Área de Solos e Nutrição de Plantas, apresentada à Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" – ESALQ. Recebido para publicação em dezembro de 2000 e aprovado em março de 2002.
- ⁽²⁾ Professor Adjunto Doutor, Departamento de Solos e Engenharia Rural, Universidade Federal de Alagoas – CECA/UFAL. Campus A.C. Simões, Cidade Universitária, Tabuleiro dos Martins, CEP 57072-970 Maceió (AL). Email: awa@fapeal.br
- ⁽³⁾ Pesquisador Científico, Seção de Fotointerpretação. Instituto Agrônomo - IAC. Caixa Postal 28, CEP 13001-970 Campinas (SP). E-mail: flombard@barao.iac.br
- ⁽⁴⁾ Professor Adjunto Doutor, Departamento de Economia e Sociologia Rural, Faculdade de Ciências Agrônomicas – FCA/UNESP. Caixa Postal 237, CEP 18603-970 Botucatu (SP).
- ⁽⁵⁾ Professor Adjunto Doutor, Departamento de Engenharia Civil, Área de Recursos Hídricos, Universidade Federal da Paraíba – UFPB. Campus II, CEP 58109-970 Campina Grande (PB). E-mail: vajapeya@dec.ufpb.br

SUMMARY: *RAINFALL, RUNOFF, AND RAINFALL-RUNOFF EROSIONITY PARAMETERS CORRELATED WITH SOIL LOSSES OF A HAPLARGIDS, PARAIBA STATE, BRAZIL*

Simple linear, multiple linear and nonlinear correlations between rainfall, runoff and rainfall-runoff erosivity parameters were studied, as well as soil losses caused by erosive rainfall on a Haplargids. Data were obtained in the period from 1986 to 1990 at the Experimental Station in Sumé, which belongs to the Universidade Federal da Paraíba - UFPB, Paraíba State, Brazil. Individual rainfalls registered in 136 rain gauges were analyzed for the determination of rainfall, runoff and rainfall-runoff erosivity parameters. The runoff volume, single or combined with rainfall characteristics improved the estimated soil losses of individual rainfall significantly. The erosivity parameters for rainfall-runoff $a(V_u \propto I_{30})^b$; $a(V_u \propto I_5)^b$; $a(EIA)^b$ and runoff $a(V_u)^b$ were best fit to estimate soil losses caused by individual storms. The rainfall erosivity parameters that included the product of rainfall volume at a maximum intensity for thirty minutes (VrI_{30}) were the ones that correlated best with soil losses.

Index terms: erosion, semiarid, models.

INTRODUÇÃO

Estudos de princípios básicos envolvidos no processo erosivo indicaram que uma precisa estimativa das perdas de solo para eventos específicos requer a combinação de um parâmetro erosividade da enxurrada com um parâmetro erosividade da chuva da Equação Universal de Perda de Solo (EUPS). A justificativa para a introdução de um parâmetro erosividade da enxurrada resulta do fato de ser o parâmetro erosividade EI_{30} calculado inteiramente de parâmetros físicos da chuva, não refletindo, portanto, o efeito da enxurrada.

Apesar de o parâmetro erosividade da chuva EI_{30} ter sido amplamente divulgado e aceito como estimador das perdas de solo provocadas por chuvas erosivas, vários autores constataram que o parâmetro erosividade da enxurrada foi estatisticamente mais exato que o parâmetro EI_{30} (Williams et al., 1971; Onstad & Foster, 1975; Williams, 1975; Foster et al., 1977a,b; Lombardi Neto, 1979).

Assim, a predição de perdas de solo para chuvas individuais erosivas pode ser estimada, com maior acurácia, associando o parâmetro erosividade da enxurrada ao parâmetro erosividade da chuva da EUPS.

A hipótese de que o processo erosivo poderia ser estimado, com maior acurácia, pelo uso de modelos matemáticos, caso o referido processo fosse representado matematicamente por dois subprocessos distintos, ou seja, erosão em sulcos e erosão entressulcos, foi abordada por vários autores (Meyer & Wischmeier, 1969; Foster & Meyer, 1975). O impacto das gotas de chuva é o processo dominante no desagregamento das partículas de solo nas áreas

em que ocorre a erosão entressulcos (Meyer et al., 1975). Por outro lado, o delgado fluxo da enxurrada que ocorre nas áreas de erosão entressulcos tem pouca capacidade de desagregação e transporte dos sedimentos na ausência do impacto das gotas de chuva. Entretanto, com o impacto das gotas de chuva, a capacidade de transporte da enxurrada na área em que ocorre a erosão entressulcos é intensificada, sendo grande parte das partículas desagregadas nessa área transportadas pela enxurrada, e não diretamente pelos salpicos das gotas de chuva (Foster & Meyer, 1975; Foster et al., 1977a,b; Lombardi Neto, 1979).

Estudando as correlações entre os parâmetros erosividade da chuva, enxurrada e chuva-enxurrada e as perdas de solo para dez locais dos EUA, Lombardi Neto (1979) concluiu que: (1) a combinação do fator erosividade da enxurrada com o fator erosividade da chuva melhorou significativamente a estimativa das perdas de solo para chuvas erosivas; (2) os parâmetros erosividade da enxurrada EIA , $a(V_u \propto I_{30})^b$ e $a(V_u \propto I_5)^b$, apresentaram uma melhor correlação com as perdas de solo do que o parâmetro EI .

Para as condições brasileiras, Carvalho et al. (1997) constataram que o volume da enxurrada, combinado ou não com características da chuva, foi importante para evidenciar o melhor desempenho dos parâmetros da erosividade da enxurrada em relação aos da chuva, especialmente o EI_{30} . Os mesmos autores concluíram que os parâmetros erosividade que melhor estimaram as perdas de solo para chuvas individuais foram: $a(EIA)^b$, $a(V_u \propto I_{30})^b$, $a(V_u \propto I_5)^b$, e $a(V_r)^b$, e, que para as condições tropicais paulistas, o efeito da enxurrada sobre a erosão, quando comparado com o da chuva, foi sobremaneira superior.

A utilização adequada da EUPS só é possível quando os seus parâmetros são determinados para as condições edafoclimáticas da região e, ou, local a ser aplicada. A determinação de um parâmetro erosividade, que melhor represente a capacidade potencial da chuva de provocar erosão para as condições edafoclimáticas da Paraíba, contribuirá para estabelecer o adequado planejamento do uso e do manejo de seus solos.

O objetivo deste trabalho foi estudar as correlações entre os parâmetros erosividade da chuva, enxurrada e chuva-enxurrada e as perdas de solo provocadas por chuvas erosivas de Sumé (PB), visando estabelecer-se o(s) melhor(es) estimador(es) da erosividade da chuva local.

MATERIAL E MÉTODOS

Os dados deste trabalho foram obtidos na Estação Experimental de Sumé (PB), pertencente à Universidade Federal da Paraíba - UFPB. A estação experimental de Sumé (PB) está localizada a latitude de 7°40' Sul, a longitude 37°00' Oeste de Greenwich e altitude entre 500 e 700 m acima do nível do mar.

De acordo com a classificação de Koeppen, a região de Sumé-PB está enquadrada no tipo climático Bsh, ou seja, seco; caracterizado pela insuficiência das precipitações pluviométricas e temperaturas elevadas (Figura 1). A precipitação pluviométrica média anual é de 695 mm. A temperatura média anual é de 24 °C e a umidade relativa média anual é de 57 % (Cadier et al., 1983).

As chuvas correspondentes ao período de 1986 a 1990 foram registradas por um pluviógrafo do tipo IH, localizado na estação meteorológica, adjacente à parcela em alqueive contínuo. Os critérios utilizados para separar as chuvas erosivas basearam-se naqueles propostos por Wischmeier & Smith (1978). Com base nestes critérios, foram separadas e analisadas 75 chuvas consideradas como erosivas.

A energia cinética da chuva, para cada segmento de intensidade constante, foi calculada pelo método proposto por Wischmeier & Smith (1978). A equação utilizada para o cálculo da energia cinética e convertida para o Sistema Internacional de Unidades (Foster et al., 1981) foi aquela obtida por Wischmeier & Smith (1978), a saber:

$$E_c = 0,119 + 0,0873 \log_{10} I \quad (1)$$

sendo: E_c : energia cinética da chuva em $\text{MJ ha}^{-1} \text{mm}^{-1}$, e I : é a intensidade de cada segmento com intensidade constante (mm h^{-1}), sendo que para valores da energia cinética correspondente a intensidades iguais ou superiores a 76 mm h^{-1} , a energia cinética passa a ter um valor máximo de $0,2832 \text{ MJ ha}^{-1}$.

Os pontos de inflexão de intensidade das chuvas individuais erosivas foram cotados e digitalizados por meio do programa computacional de Catâneo et al. (1982), que, a partir dessas informações, calcularam os parâmetros erosividade da chuva, da enxurrada e da chuva-enxurrada com exceção do volume de enxurrada, obtido diretamente no tanque coletor da parcela experimental.

O solo onde estão localizadas as parcelas providas de tanques coletores de enxurrada foi classificado como Luvisolo Hipocrômico Órtico vértico A fraco textura argilosa fase caatinga hiperxerófila (Bruno não-Cálcico). Os dados de perdas de solo foram obtidos numa parcela experimental com dimensões de $22,13 \times 4,55 \text{ m}$ e declividade de 4 %. As parcelas foram delimitadas por chapas galvanizadas cravadas 15 cm no solo e, na suas extremidades inferiores, foram instalados sistemas coletores de enxurrada, constituídos de uma calha conectada por um cano de PVC a um primeiro tanque de fibro-cimento, localizado imediatamente abaixo da parcela, que, por sua vez, estava conectado ao segundo tanque de fibro-cimento, por meio de um divisor de enxurrada do tipo "Geib". Após cada chuva, o material dos tanques foi coletado e amostrado de acordo com as recomendações de Cadier et al. (1983). O manejo da parcela experimental seguiu as recomendações de

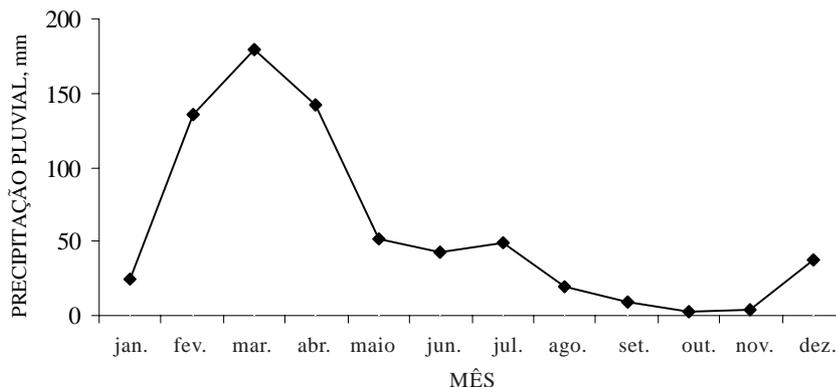


Figura 1. Distribuição temporal dos valores médios mensais da precipitação pluvial em Sumé (PB).

Wischmeier & Smith (1978), ou seja, foi mantida continuamente em condições de alqueive contínuo.

A correção das perdas de solo, para o declive de 9 % da parcela-padrão, foi feita de acordo com a equação proposta por Bertoni & Lombardi Neto (1985):

$$A = 0,00984 S^{1,18} L^{0,63} \quad (2)$$

em que A é a perda de solo, S é o grau de declive em percentagem, L é o comprimento de rampa em metros.

A equação final utilizada para a transformação direta das perdas de solo, para a declividade de 9 % da parcela-padrão foi a seguinte:

$$A_1 = 2,603 A_2 \quad (3)$$

sendo: A₁ a perda de solo para o declive de 9,0 % e A₂ a perda de solo para o declive de 4 %.

As equações de regressão, os coeficientes lineares (a), os coeficientes de regressão (b, c e d), os coeficientes de correlação (r) e de determinação (R²) foram obtidos por meio do programa estatístico SAS (SAS Institute, 1988). Para verificar a homogeneidade entre os coeficientes de correlação, foi utilizado o teste proposto por Graybill (1961), sendo os coeficientes de correlação testados dois a dois.

Desenvolvimento dos modelos matemáticos e sua aplicação aos parâmetros erosividade da chuva, da enxurrada e da chuva-enxurrada

Simbologia utilizada:

a, b, c, d ..	Coeficientes de regressão ajustados
D	Tempo de duração da enxurrada (h)
T	Tempo de duração da chuva (mm)
EI ₃₀	Parâmetro erosividade da chuva (MJ mm ha ⁻¹ h ⁻¹)
EIA	Parâmetro erosividade da chuva-enxurrada para o tempo da enxurrada (mm ² h ⁻¹)
I ₃₀	Intensidade máxima em 30 minutos (mm h ⁻¹)
I ₅	Intensidade máxima em 5 minutos (mm h ⁻¹)
α	Termo de proporcionalidade entre a enxurrada e a chuva (adimensional)
σ _{pu}	Pico da taxa de enxurrada (m ³ s ⁻¹)
V _u	Volume da enxurrada (mm)
V _r	Volume de chuva (mm)
eq	Equação
mod	Modelo
Y	Estimativas das perdas de solo por erosão (Mg ha ⁻¹)

A premissa de que a chuva e a enxurrada poderiam ser expressas por uma intensidade característica constante (I₃₀) e uma taxa característica constante (σ_{pu}), ou seja, intensidade da chuva e a taxa do pico de descarga da enxurrada,

respectivamente, possibilitou o estabelecimento das seguintes relações matemáticas (Lombardi Neto, 1979; Carvalho et al., 1997):

$$\sigma_{pu} I_{30}^{-1} = D T^{-1} = \alpha \quad (4)$$

$$D = \alpha T \quad (5)$$

$$\sigma_{pu} = \alpha I_{30}^{-1} \quad (6)$$

Como o volume da enxurrada (V_u) (Lombardi Neto, 1979) pode ser expresso pela equação (7):

$$V_u = \sigma_{pu} D \quad (7)$$

Então, substituindo as equações (5) e (6) na equação (7), pode-se deduzir que:

$$V_u = \alpha^2 I_{30} T \quad (8)$$

Considerando que o volume da chuva (V_r) é igual ao produto de sua intensidade (I₃₀) pela sua duração:

$$V_r = I_{30} T \quad (9)$$

Então, substituindo a equação (9) na equação (8), pode-se deduzir que:

$$V_u = \alpha^2 V_r \quad (10)$$

Conseqüentemente:

$$\alpha = (V_u V_r^{-1})^{1/2} \quad (11)$$

A equação (11) foi utilizada em combinação com inúmeros parâmetros erosividade da chuva-enxurrada como propostos por Lombardi Neto (1979) e Carvalho et al. (1997).

Modelos matemáticos desenvolvidos para estimar as perdas de solo causadas pela chuva nos entressulcos possibilitaram concluir que, após o início da enxurrada, as perdas de solo são proporcionais ao quadrado de sua intensidade. Com base nesta premissa, foi proposta a seguinte equação (Meyer & Wischmeier, 1969; Foster & Meyer, 1975):

$$EIA = (I_{30})^2 D \quad (12)$$

A diferença entre os parâmetros EI₃₀ e EIA é relativa à duração na qual o I₃₀ proporciona as perdas de solo. Quanto ao parâmetro EI₃₀, a duração é relativa ao tempo total da chuva (T) e, para o EIA, é relativa ao tempo total da enxurrada (D). Portanto, o parâmetro EIA estima as perdas de solo apenas quando ocorre enxurrada, enquanto o EI₃₀ estima as perdas de solo na presença ou não da enxurrada (Lombardi Neto, 1979; Foster et al., 1982).

Como a duração da enxurrada (D) não foi mensurada nas parcelas experimentais, e como tanto o volume de chuva (V_r) quanto o da enxurrada (V_u) foram expressos em unidade de volume por unidade de área, representando, respectivamente, as alturas

pluviométricas e linimétricas, a mesma foi deduzida, por meio das seguintes relações (Lombardi Neto, 1979):

Como (eq. 9):

$$V_r = I_{30} T$$

Então:

$$T = V_r I_{30}^{-1} \quad (13)$$

Substituindo a equação (5) na equação (12); a equação (11) na (14) e a equação (13) na equação (15), tem-se que:

$$EIA = (I_{30})^2 \alpha T \quad (14)$$

$$EIA = (I_{30})^2 (V_u V_r^{-1})^{1/2} T \quad (15)$$

$$EIA = (I_{30})^2 (V_u V_r^{-1})^{1/2} V_r I_{30}^{-1} \quad (16)$$

Por conseguinte, deduz-se que:

$$EIA = I_{30} (V_u V_r)^{1/2} \quad (17)$$

Considerando que o parâmetro EIA apresenta em sua composição os termos V_u e V_r , respectivamente, o mesmo foi considerado neste trabalho como um parâmetro erosividade da chuva-enxurrada.

Pelo fato de ser o cálculo do parâmetro erosividade da chuva do tipo EI demorado e complexo, Foster et al. (1982) introduziram alguns parâmetros, objetivando simplificar a obtenção de um parâmetro erosividade da chuva, de modo que não houvesse a necessidade de se calcular a energia cinética e que apresentassem uma estimativa das perdas de solo, semelhante àquela obtida pelo parâmetro EI, a saber:

$$Y = a + b V_r I_{30} \quad (18)$$

$$Y = a + b V_r (I_{30})^{1,14} \quad (19)$$

$$Y = a + b (0,119 + 0,0873 \log I_{30}) V_r I_{30} \quad (20)$$

$$Y = a + b (V_r)^b \quad (21)$$

Para obter a combinação de um parâmetro erosividade da chuva-enxurrada (EIA) com um parâmetro erosividade da chuva (EI_{30}), Lombardi Neto (1979) e Foster et al. (1982), propuseram o seguinte parâmetro erosividade da chuva-enxurrada, expresso pela equação:

$$Y = a + b (EI_{30}) + c EIA \quad (22)$$

Considerando a hipótese de que existiria uma relação não-linear entre as perdas de solo e os parâmetros EI e EIA, respectivamente, foram propostas as seguintes equações (Lombardi Neto, 1979; Foster et al., 1982):

$$Y = a (EI_{30})^b \quad (23)$$

$$Y = a (EIA)^b \quad (24)$$

Também foi proposto um parâmetro erosividade da enxurrada, expresso por uma equação não-linear, objetivando verificar se existiria um efeito não-linear entre as perdas de solo e a enxurrada, expresso pela seguinte equação (Lombardi Neto, 1979; Foster et al., 1982):

$$Y = a (V_u)^b \quad (25)$$

Meyer et al. (1975) consideraram a hipótese de que o processo erosivo poderia ser estimado, com maior acurácia, por meio de modelos matemáticos, caso o referido processo fosse representado matematicamente por dois subprocessos distintos, a saber: erosão em sulcos e erosão entressulcos. Considerando que os parâmetros, EI_{30} , V_u e EIA, poderiam representar a erosão entressulcos e em sulcos, respectivamente, Lombardi Neto (1979) e Foster et al. (1982) propuseram as seguintes equações:

$$Y = a + b EI_{30} + c V_u \quad (26)$$

$$Y = a + b EIA + c V_u \quad (27)$$

Uma modificação da EUPS foi proposta por Williams (1975). A equação universal de perdas de solo modificada (MEUPS) difere da EUPS no que diz respeito à substituição do fator R por um fator com base no escoamento superficial. O autor constatou que o parâmetro erosividade da enxurrada, que combinava o volume e o pico da taxa da enxurrada, apresentou melhor correlação com as perdas de solo do que o parâmetro erosividade da enxurrada, que considerava apenas o volume de enxurrada. O parâmetro erosividade da enxurrada foi expresso pela seguinte equação:

$$Y = a (V_u \sigma_{pu})^b \quad (28)$$

Como a taxa do pico da enxurrada não foi calculada para a enxurrada coletada nas parcelas experimentais e como essa taxa poderia ser expressa pelo termo (αI_{30}), então substituindo este termo na equação (29), obtém-se a equação (30), conforme sugeriram Lombardi Neto (1979) e Foster et al. (1982):

$$Y = a (V_u \alpha I_{30})^b \quad (29)$$

A inclusão do termo (αI_{30}), como estimador da taxa do pico da enxurrada, é exclusivamente matemática, visto que $\sigma_{pu} = \alpha I_{30}$. Portanto, outros parâmetros erosividade da chuva-enxurrada semelhantes aos de Williams (1975) foram dados pelas seguintes equações:

$$Y = a (V_u \alpha I_5)^b \quad (30)$$

$$Y = a + b (1/2) EI_{30} + c (1/2) V_u (\alpha I_{30})^{1/3} \quad (31)$$

$$Y = a + b (1/2) EI_{30} + c (1/2) V_u (\alpha I_5)^{1/3} \quad (32)$$

$$Y = a + b EIA + c V_u (\alpha I_{30})^{1/3} \quad (33)$$

$$Y = a + b EIA + c V_u (\alpha I_5)^{1/3} \quad (34)$$

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os coeficientes de correlação entre os parâmetros erosividade da chuva, enxurrada e chuva-enxurrada e as perdas de solo foram significativos a 1 % indicando sua influência nas perdas de solo por erosão nas condições edafoclimáticas de Sumé-PB (Quadro 1). Para efeito de comparações, estão apresentados, em ordem decrescente no quadro 2, o teste de homogeneidade para os valores dos coeficientes de correlação (r), obtidos entre os parâmetros erosividade da chuva, enxurrada, chuva-enxurrada, e as perdas de solo em condições da parcela-padrão. Mediante a análise global dos coeficientes de correlação, pode-se constatar que os valores dos coeficientes de correlação obtidos variaram de 0,5744 a 0,9343 para os parâmetros volume de chuva (V_r)^b e ($V_u \propto I_{30}$)^b, respectivamente.

Parâmetros erosividade da chuva

Os parâmetros erosividade da chuva (modelos 1 a 7, Quadro 1) foram os que apresentaram os menores coeficientes de correlação, concordando com

os resultados obtidos por Lombardi Neto (1979); Foster et al. (1982); Carvalho et al. (1993), e Carvalho et al. (1997). Dentre os parâmetros erosividade da chuva analisados, constatou-se que aqueles que incluíram o produto do volume de chuva pela intensidade máxima em trinta minutos (mod. 1 a 3, Quadro 1); na forma linear e não-linear, respectivamente, foram os que melhor se correlacionaram ($r = 0,7493$ a $0,7450$) com as perdas de solo, explicando-as em torno de 56 %. Em termos absolutos, os resultados (mod. 1 a 3, Quadro 1) foram, em geral, mais baixos que os obtidos em Campinas e nos EUA por Lombardi Neto (1979) e Foster et al. (1982) e mais altos que os obtidos para Mococa (SP) e Pindorama (SP) por Carvalho (1992).

O modelo não-linear (mod. 5, Quadro 1) utilizado para o parâmetro EI_{30} não melhorou, de forma significativa, a estimativa das perdas de solo, quando comparado ao modelo linear (mod. 4, Quadro 1), que apresentou coeficiente de correlação ligeiramente superior. Da mesma forma, o modelo não-linear (mod. 2, Quadro 1) utilizado para o parâmetro VrI_{30} não melhorou a estimativa das perdas de solo, quando comparado ao modelo linear (mod. 2,

Quadro 1. Valores dos coeficientes de correlação, de determinação e de regressão (a, b e c), obtidos entre as perdas de solo em condições da parcela-padrão e parâmetros erosividade da chuva, enxurrada e chuva-enxurrada ocorridos em Sumé (PB)

Modelo	(r) ⁽¹⁾	(R ²)	Coeficiente de regressão			
			a	b	c	
Erosividade da chuva						
01	$Y = a + b V_r I_{30}$	0,7493**	0,5616	0,64484	0,02582	
02	$Y = a + b V_r (I_{30})^{1,14}$	0,7493**	0,5615	0,84285	0,00139	
03	$Y = a + b (0,119 + 0,0873 \log I_{30}) V_r I_{30}$	0,7450**	0,5551	0,91336	0,00514	
04	$Y = a + b EI_{30}$	0,7342**	0,5391	0,79664	0,01001	
05	$Y = a (EI_{30})^b$	0,7232**	0,5231	2,23295	1,42846	
06	$Y = a + b V_r$	0,7001**	0,4901	-2,15687	0,20425	
07	$Y = a (V_r)^b$	0,5744**	0,3300	1,42610	2,07496	
Erosividade da enxurrada						
08	$Y = a (V_u)^b$	0,9311**	0,8670	0,10702	0,88249	
09	$Y = a (EIA)^b$	0,9202**	0,8468	0,05224	1,33184	
10	$Y = a + b V_u$	0,8120**	0,6595	0,58967	0,26894	
Erosividade da chuva-enxurrada						
11	$Y = a (V_u \propto I_{30})^b$	0,9343**	0,8729	0,05969	0,16753	
12	$Y = a (V_u \propto I_5)^b$	0,9301**	0,8651	0,10574	0,55185	
13	$Y = a + b EI_{30} + c V_u$	0,8126**	0,6604	0,55931	0,00092	0,24911
14	$Y = a + b EIA + c V_u$	0,8141**	0,6534	0,36259	0,03779	0,22800
15	$Y = a + b EIA + c V_u (\propto I_5)^{1/3}$	0,8068**	0,6510	0,58254	0,05006	0,46772
16	$Y = a + b (EIA) + c V_u (\propto I_{30})^{1/3}$	0,8057**	0,6492	0,61555	0,06152	0,05001
17	$Y = a + b (1/2) EI_{30} + c (1/2) V_u (\propto I_5)^{1/3}$	0,8050**	0,6481	0,85547	0,00315	0,10260
18	$Y = a + b (1/2) EI_{30} + c (1/2) V_u (\propto I_{30})^{1/3}$	0,8000**	0,6399	1,06193	0,00148	0,12492
19	$Y = a + b EI_{30} + b EIA$	0,7748**	0,6003	-0,06256	0,00413	0,13766
20	$Y = a + b EIA$	0,7600**	0,5776	-0,26234	0,21042	

⁽¹⁾ Todos os coeficientes de correlação foram significativos a 1% pelo teste t.

Quadro 2. Teste de homogeneidade dos valores dos coeficientes de correlação entre as perdas de solo em condições da parcela-padrão e os parâmetros erosividade da chuva, enxurrada e chuva-enxurrada ocorridos em Sumé (PB)

	Modelo	(r) ⁽¹⁾
11	$A = a (V_u \propto I_{30})^b$	0,9343 A
08	$A = a (V_u)^b$	0,9311 A
12	$A = a (V_u \propto I_5)^b$	0,9301 A
09	$A = a (EIA)^b$	0,9202 A
10	$A = a + b V_u$	0,8120 B
20	$A = a + b EIA$	0,7600 BC
01	$A = a + b V_r I_{30}$	0,7493 BCD
02	$A = a + b V_r (I_{30})^{1,14}$	0,7492 BCD
03	$A = a + b (0,119 + 0,0873 \log I_{30}) V_r I_{30}$	0,7450 BCD
04	$A = a + b EI_{30}$	0,7342 BCD
05	$A = a (EI_{30})^b$	0,7232 BCD
06	$A = a + b V_r$	0,7001 BCD
07	$A = a (V_r)^b$	0,5744 D

⁽¹⁾ Coeficientes de correlação seguidos pela mesma letra não diferem entre si a 5 % pelo teste de Grybill.

Quadro 1), que mostrou coeficientes de correlação iguais. O volume de chuva (V_r), quando expresso por modelos não-lineares (mod. 7, Quadro 1), apresentou o menor coeficiente de correlação, diferindo estatisticamente (Quadro 2) do modelo linear (mod. 6, Quadro 1). Portanto, constata-se a inexistência de uma relação não-linear entre as perdas de solo e os parâmetros erosividade da chuva, como sugerido por Lombardi Neto (1979).

Os modelos lineares, expressos pelo produto entre o volume da chuva e a intensidade máxima em trinta minutos (mod. 1 a 3, Quadro 1), contribuíram para melhorar a correlação com as perdas de solo, quando comparados com os modelos que utilizaram o volume da chuva isoladamente (mod. 6 a 7, Quadro 1), diferindo estatisticamente do modelo não-linear (Quadro 2). Os resultados obtidos concordam com os anteriormente registrados por Foster et al. (1982); Carvalho et al. (1997) e Albuquerque et al. (1998). Os parâmetros erosividade da chuva, expresso pelo produto entre o volume da chuva e a intensidade máxima em trinta minutos (mod. 1 a 3, Quadro 1), por exigirem apenas a informação do volume e da intensidade máxima da chuva e dispensar o cálculo moroso da energia cinética, pode substituir o parâmetro EI_{30} com a mesma acurácia, visto que não se constatou diferença estatística entre eles, sendo a diferença, em termos absolutos, atribuída ao acaso.

Parâmetros erosividade da enxurrada

O parâmetro erosividade da enxurrada na forma não-linear (mod. 8, Quadro 1) apresentou, em termos absolutos, o segundo melhor coeficiente de correlação, sem diferir estatisticamente (Quadro 2)

do parâmetro que apresentou o melhor coeficiente de correlação (mod. 11, Quadro 1). Por outro lado, esse parâmetro diferiu estatisticamente (Quadro 2) daquele na forma linear (mod. 9, Quadro 1). O fato de o parâmetro erosividade da enxurrada ter melhor explicado as perdas de solo do que os parâmetros erosividade da chuva (mod. 1 a 7, Quadro 1) indica que o potencial erosivo da enxurrada nos sulcos, para as condições edafoclimáticas de Sumé (PB), redonda em maiores efeitos sobre as perdas de solo do que a erosividade da chuva, representada pelo impacto das gotas de chuva, corroborando com Lombardi Neto (1979); Carvalho (1992) e Albuquerque et al. (1998).

Os resultados obtidos para o parâmetro erosividade da enxurrada evidenciam que, em condições tropicais, o volume da enxurrada talvez seja um melhor preditor das perdas de solo, considerando os maiores valores de intensidade das chuvas tropicais, quando comparados aos das chuvas de clima temperado. Portanto, devem-se envidar esforços no sentido de avaliar este parâmetro por um período mais longo, objetivando validar o volume de enxurrada como o fator erosividade da equação universal de perda de solo.

Em termos absolutos, os coeficientes de correlação obtidos no presente trabalho, concernentes aos parâmetros erosividade da enxurrada, foram, em geral, maiores do que os obtidos nos E.U.A por Foster et al. (1982) e em Mococa (SP) e Pindorama (SP) por Carvalho (1992); entretanto, menores que os obtidos em Campinas (SP) por Carvalho (1992).

Parâmetros erosividade da chuva-enxurrada

Os parâmetros erosividade da chuva-enxurrada, expressos pelos modelos não-lineares (lineares por anamorfose) $(V_u \propto I_{30})^b$; $(V_u \propto I_5)^b$ e $(EIA)^b$, apresentaram os melhores coeficientes de correlação, diferindo estatisticamente (Quadro 2) dos demais parâmetros, com exceção do parâmetro $(V_u)^b$. Os resultados obtidos permitem concluir que tais parâmetros expressos por modelos não-lineares apresentaram uma melhora significativa na explicação das perdas de solo obtidos em condições de alqueive, quando comparados com os demais parâmetros, cuja explicação dos eventos relativos às perdas de solo em condições da parcela-padrão foi em torno de 86 %.

Corroborando com os resultados obtidos neste trabalho, Lombardi Neto (1979) e Foster et al. (1982) constataram que a combinação de um fator erosividade da enxurrada com um fator erosividade da chuva melhorou significativamente a estimativa das perdas de solo para chuvas específicas. Resultados semelhantes também foram obtidos por Carvalho (1992), que verificou que os parâmetros erosividade que melhor explicaram as perdas de solo das chuvas individuais erosivas para Campinas (SP), Mococa (SP) e Pindorama (SP) foram os seguintes: $(V_u \propto I_{30})^b$, $(V_u \propto I_5)^b$ e $(EIA)^b$, respectivamente.

De forma geral, os resultados obtidos evidenciaram alta correlação entre os modelos não-lineares e as perdas de solo em Sumé (PB), provavelmente em decorrência de chuvas tropicais de alta intensidade. Provavelmente, as perdas de solo, quando correlacionadas com modelos lineares, são superestimadas para as chuvas de baixa intensidade e, por outro lado, subestimadas para as de alta intensidade (Carvalho et al., 1997).

Os modelos lineares múltiplos (mod. 13 a 19, Quadro 1) apresentaram valores dos coeficientes de correlação semelhantes. O uso do I_5 ou do I_{30} (mod. 15 a 17, Quadro 1) para a estimativa do pico da taxa de enxurrada não contribuiu para uma explicação mais precisa das perdas de solo em Sumé (PB).

CONCLUSÕES

1. Os parâmetros erosividade da chuva-enxurrada e enxurrada $a(V_u \propto I_{30})^b$; $a(V_u \propto I_5)^b$; $a(EIA)^b$ e $a(V_u)^b$, respectivamente, foram os melhores estimadores do potencial erosivo das chuva em Sumé (PB).

2. Dentre os parâmetros erosividade da chuva, os que melhor se correlacionaram com as perdas de solo foram os que incluíram o produto do volume de chuva pela intensidade máxima em trinta minutos (VrI_{30}).

3. Apesar de os parâmetros erosividade da chuva-enxurrada apresentarem as melhores correlações com as perdas de solo; na atual conjuntura da pesquisa da região, apresentariam limitações quanto à sua aplicabilidade, visto que seria necessário o estabelecimento de tanques coletores em cada local e, ou, região em que se quisesse determinar estes parâmetros. Por outro lado, o parâmetro erosividade da chuva, VrI_{30} , por exigir apenas as informações do volume e da intensidade máxima da chuva e dispensar o cálculo moroso da energia cinética, apresenta-se como um parâmetro de melhor aplicabilidade para a região.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Departamento de Engenharia Civil, área de Recursos Hídricos da Universidade Federal da Paraíba (CCT/UFPB), Campus II, Campina Grande (PB), na pessoa do Prof. Doutor Vajapeyam S. Srinivasan, que nos concedeu os dados da estação experimental de Sumé (PB). Agradecemos também ao Prof. Doutor Carlos Galvão, que, gentilmente, nos auxiliou com preciosas informações concernentes ao experimento.

LITERATURA CITADA

- ALBUQUERQUE, A.W.; CHAVES, I.B. & VASQUES FILHO, J. Parâmetros erosividade da chuva e enxurrada correlacionados com as perdas de solo de um solo Bruno Não-Cálcico de Sumé (PB). R. Bras. Ci. Solo, 22:743-747, 1998.
- BERTONI, J. & LOMBARDI NETO, F. Conservação do solo. Piracicaba, Livrocere, 1985. 368p.
- CADIER, E.; FREITAS, B.J. & LEPRUN, J.C. Bacia Experimental de Sumé: instalação e primeiros resultados. Recife, SUDENE, 1983. 87p. (Série hidrológica, 16)
- CARVALHO, M.P. Fator erosividade da chuva-enxurrada para as chuvas individuais do estado de São Paulo. Botucatu, Universidade Estadual Paulista, 1992. 110p. (Tese de Doutorado)
- CARVALHO, M.P.; CATANEO, A. & LOMBARDI NETO, F. Índices de erosividade da chuva e enxurrada correlacionados com as perdas de solo e determinação da erodibilidade de um Latossolo Roxo distrófico de Campinas (SP). R. Bras. Ci. Solo, 17:445-450, 1993.
- CARVALHO, M.P.; CATANEO, A. & LOMBARDI NETO, F. Parâmetros de erosividade da chuva e da enxurrada correlacionados com as perdas de solo e determinação da erodibilidade de um Podzólico Vermelho-Amarelo de Pindorama. R. Bras. Ci. Solo, 21:279-286, 1997.
- CATANEO, A.; CASTRO FILHO, C. & ACQUAROLE, R.M. Programa para cálculo de índices de erosividade de chuvas. R. Bras. Ci. Solo, 6:236-239, 1982.
- FOSTER, G.R.; McCOOL, D.K.; RENARD, K.G. & MOLDENHAUER, W.C. Conversion of the Universal Soil Loss Equation the SI metric units. J. Soil Water Conser., 36:355-359, 1981.
- FOSTER, G.R., LOMBARDI NETO, F. & MOLDENHAUER, W.C. Evaluation of rainfall-runoff erosivity factors for individual storms. Trans. Am. Soc. Agric. Eng., 25:124-129, 1982.
- FOSTER, G.R. & MEYER, L.D. Mathematical simulation of upland erosion by fundamental erosion mechanics. In: PRESENT AND PROSPECTIVE TECHNOLOGY FOR PREDICTING SEDIMENT YIELD AND SOURCES, 1., Oxford, 1972. Proceedings. Oxford, UDSA, Agricultural Research Service, 1975. p.190-207.
- FOSTER, G.R.; MEYER, L.D. & ONSTAD, C.A. A runoff erosivity factor and variable slope length exponents for soil loss estimates. Trans. Am. Soc. Agric. Eng., 20:678-682, 1977a.
- FOSTER, G.R.; MEYER, L.D. & ONSTAD, C.A. A runoff erosivity factor and variable slope length exponents for soil loss estimates. Trans. Am. Soc. Agric. Eng., 20:683-687, 1977b.
- GRAYBILL, F.A. An introduction to linear statistical models. New York, McGrawHill, 1961. 684p.
- LOMBARDI NETO, F. Universal soil loss equation (USLE), runoff erosivity factor, slope length exponent, and slope steepness exponent for individual storms. West Lafayette, Purdue University, 1979. 128p. (Tese de Doutorado)
- MEYER, L.D. & WISCHMEIER, W.H. Mathematical simulation of the process of soil erosion by water. Trans. Am. Soc. Agric. Eng., 12:754-758, 1969.

- MEYER, L.D.; FOSTER, G.R. & ROMKENS, M.J.M. Source of soil eroded by water from upland slopes. In: PRESENT AND PROSPECTIVE TECHNOLOGY FOR PREDICTING SEDIMENT YIELDS AND SOURCES, 1., Oxford, 1972. Proceedings. Oxford, USA, Research Service, 1975. p.177-189.
- ONSTAD, C.A & FOSTER, G.R. Erosion modeling on watershed. Trans. Am. Soc. Agric. Eng., 19:288-292, 1975.
- SAS INSTITUTE. SAS/STAT: Guide for personal computers, 6.ed. Cary, 1988. 378p.
- WILLIAMS, J.R.; HILER, E.A. & BAIRD, R.W. Predicting of sediment yield from small watersheds. Trans. Am. Soc. Agric. Eng., 14:1157-1162, 1971.
- WILLIAMS, J.R. Sediment-yield prediction with universal equation using runoff energy factor. In: PRESENT AND PROSPECTIVE TECHNOLOGY FOR PREDICTING SEDIMENT YIELD AND SOURCES. Washington, USDA, Agricultura Research Service, 1975. p.244-252.
- WISCHMEIER, W.H. & SMITH, D.D. Predicting rainfall erosion losses; a guide to conservation planning. Washington, USDA, 1978. 58p. (Agricultural Handbook, 537)

