

APLICAÇÃO DO MODELO WEPP EM PARCELAS E MICROBACIAS NO SEMI-ÁRIDO NORDESTINO

*Fernanda Maria de Lima Paiva¹; Laércio Leal dos Santos²;
Vajapeyam Srirangachar Srinivasan³; Ricardo de Aragão⁴; Celso Augusto G. Santos⁵ & Itamara
Mary L. M. Taveira⁶*

Resumo --- O presente trabalho apresenta os resultados obtidos com a modelagem dos processos de escoamento superficial e de erosão nas microbacias da Bacia experimental de São João do Cariri – PB, utilizando o modelo hidrossedimentológico WEPP (*Water Erosion Prediction Project*, Flanagan e Nearing). Para este fim, dados coletados no período de 1999 a 2006 em duas parcelas de 100 m² e em três microbacias de 0,16 a 1,63 ha foram utilizados. Foram utilizados 179 eventos nas parcelas, 160 eventos na microbacia 1 e 116 eventos nas microbacias 2 e 3, para calibração e validação do modelo. As diversas etapas da modelagem deste estudo foram: (1) preparação dos arquivos de dados, (2) calibração de parâmetros do modelo e (3) validação dos parâmetros. Os parâmetros principais calibrados foram: Saturação inicial do solo (S_i), erosão pelo fluxo superficial (K_i), erosão pelo fluxo em canais ou em sulcos (K_r) e condutividade hidráulica saturada (K_s). Os parâmetros calibrados foram validados nas próprias unidades experimentais. O modelo WEPP representou bem o escoamento e apenas razoavelmente bem a produção de sedimentos nas parcelas, porém nas microbacias enquanto simulou razoavelmente bem o escoamento, na simulação da produção de sedimento apresentou grandes discrepâncias.

Abstract --- The present work is an attempt in modeling runoff and erosion processes in the microbasins of the Experimental Basin of São João de Cariri, using the WEPP (*Water Erosion Prediction Project*, Flanagan e Nearing, 1995). Data collected in two 100 m² erosion plots and three microbasins of 0.16 to 1.63 ha were utilized for the application of the model. Sixty events were selected for the modeling process that involved essentially four steps: (1) preparation of the entry files of data; (2) calibration of the model parameters and (3) validation of the parameters. The main model parameters that need to be determined either by experimental measurements or by calibration are the initial saturation of the soil (S_i), the inter-rill soil erosion parameter (K_i), the rill or channel erosion parameter of the soil due to shear stress (K_r) and the saturated hydraulic conductivity of the soil layer (K_s). The calibrated parameters were validated in each case. The results show that the model WEPP simulates the runoff fairly well the runoff in the experimental units but the simulation of soil erosion did not yield good results in all cases.

Palavras-chave: modelo hidrossedimentológico; calibração e validação.

¹ Doutoranda em Engenharia Civil - Área de Concentração: Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos, (DECIV/CTG/UFPE), Av Acadêmico Hélio Ramos, s/n, Cidade Universitária, Recife/PE. Caixa Postal 7800. CEP: 50741 - 530. Tel: (81) 2126 - 7216. E-mail: fernandamipaiva@yahoo.com.br

² Doutorando em Engenharia Civil - Área de Concentração: Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos, (DECIV/CTG/UFPE). E-mail: englaercio@yahoo.com.br

³ Professor do curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental – AERH/DEC/CCT/UFCG. Fone: 0XX 83 3310-1156 - Caixa Postal, 505 – CEP: 580100-970 – Campina Grande, PB – vajapeyam@yahoo.com

⁴ Professor da Universidade Federal de Sergipe – DEC/CT/UFS – ricardoaragao@yahoo.com

⁵ Professor da Universidade Federal da Paraíba – UFPB/DEC/CT, 58051-900, João Pessoa-PB, Telefax: 0XX 83 3216-7684 – celso@ct.ufpb.br

⁶ Aluna de iniciação científica – AERH/DEC/CCT/UFCG – itamaramary@gmail.com

INTRODUÇÃO

Os problemas relacionados à erosão dos solos têm aumentado consideravelmente nos últimos anos, especialmente em países como o Brasil, onde grande parte da população está ligada às atividades econômicas da agricultura. Na região semi-árida do nordeste do país, a degradação dos solos pela erosão hídrica é um sério problema que deve ser estudado nas suas mais diversas formas, como na avaliação do grau de influência da cobertura vegetal na produção de sedimentos e na degradação dos solos.

Em particular, nas regiões semi-áridas há uma relação marcada entre a chuva e a erosão que aceleram a degradação dos solos (López-Bermúdez e Albaladejo, 1990). Nas regiões de clima desértico, como é o caso da região semi-árida do Nordeste do Brasil, técnicas de simulação de chuvas são amplamente usadas para suprir a falta de dados pluviométricos e avaliar a influência de sua intensidade e duração na produção de sedimentos (Nolan et al., 1997; Stomph et al., 2002).

Buscando amenizar o problema da falta de informações hidro-climatológicas, as bacias experimentais foram instaladas no semi-árido nordestino com o objetivo de servir como fonte de informações para estudos sobre os impactos das modificações do meio ambiente e para o conhecimento do comportamento hidrossedimentológico nessa região. No Estado da Paraíba, mais precisamente no Cariri Paraibano, a Bacia Experimental de São João do Cariri (BESJC), serve como local de fonte de dados de vazão e de erosão. Várias pesquisas já foram realizadas nesta bacia, tendo sempre como objetivo a implantação de metodologias e técnicas de modelagem e análise dos processos de vazão e erosão, uma vez que a região semi-árida sofre com a irregularidade pluviométrica, pois a precipitação no semi-árido nordestino apresenta uma péssima distribuição espacial e temporal, o que influencia diretamente no escoamento superficial e na produção de sedimentos.

Como qualquer outro fenômeno do âmbito de estudo da Engenharia de Recursos Hídricos, a erosão do solo provocada pela ação do escoamento superficial, é estudada do ponto de vista das interrelações espaciais, de seus fatores condicionantes, e principalmente, dos fatores físicos do solo. Segundo Guerra (1998), a erosividade da chuva, as propriedades físicas do solo, a cobertura vegetal e as características das encostas, são fatores controladores da variação das taxas de erosão. Devido a interação desses fatores que certas áreas erodem mais do que outras.

Os fenômenos erosivos se destacam como um dos mais importantes problemas ambientais em todo no mundo. A erosão dos solos é influenciada diretamente pelo escoamento superficial, e o aumento das vazões produz o crescimento da quantidade de sedimentos em suspensão nos canais. O aumento da produção de sedimentos acarreta inúmeros danos para o meio ambiente e conseqüentemente para o homem. Dentre os problemas oriundos do aumento da erosão dos solos,

está a redução da capacidade produtiva dos solos, o acúmulo de sedimentos nos rios e reservatórios e no aumento do transporte de poluentes agregados aos sedimentos para as fontes de água (Cogo et al., 2003; Guerra, 1998).

Desde meados da década de 1940, estudos sobre a erosão dos solos vêm sendo alvo de diversos pesquisadores em todas as partes do mundo (Guerra e Botelho, 1998). São vários os trabalhos de relevância sob erosão do solo, como exemplo, podemos citar os de Wischmeier (1960; 1976), Vanoni (1970), Kirkby (1980), Lal (1990), Singh (1995), Beven e Moore (1993) e Yu et al. (1999).

A partir de meados da década de 1960 com o avanço cada vez maior da capacidade de processamento de informações em microcomputadores e o desenvolvimento de estudos sob erosão, os modelos matemáticos, também conhecidos como hidrológicos (empíricos, conceituais ou de base física), vêm sendo utilizados em diversos estudos em todo o mundo (Amore et al., 2004).

Segundo Guerra e Botelho (1998) modelos de predição existem em todos os lugares do mundo, como por exemplo, a EUPS – Equação Universal de Perda de Solo. Mais recentemente, modelos hidrossedimentológico de base física como o WEPP – *Watershed Erosion Prediction Project*, o Wesp – *Watershed Erosion Simulation Program*, e o Kineros – *Kinematic Runoff and Erosion Model*, têm sido cada vez mais aplicados. Esses modelos são amplamente utilizados em estudos de análise e acompanhamento de sistemas de aproveitamento e controle de recursos naturais.

Na aplicação de um modelo hidrossedimentológico são utilizados inúmeras informações de entrada, essas informações são dados hidrológicos (temperatura, insolação, precipitação, vazão e erosão, medições das propriedades físicas do solo e das características morfológicas da bacia). As bacias experimentais são como uma fonte de dados para os modelos, nelas são coletadas diversas informações, tais como: (a) intensidade da chuva; (b) altura de chuva; (c) lâmina escoada; (d) erosão; entre outras informações físicas do clima, do solo e do ciclo hidrológico. Essas informações são coletadas diariamente para parcelas e microbacias, que servem como base durante o processo de calibração ou de dados de entrada em modelos de predição de vazão-erosão.

O presente artigo apresenta e discute a modelagem da vazão e da produção de sedimentos na erosão dos solos na Bacia Experimental de São João do Cariri, através da aplicação de um modelo do modelo WEPP, esse artigo se propõe a apresentar a evolução dos conhecimentos e técnicas no estudo dos processos de vazão e erosão no semi-árido paraibano a partir da coleta de dados de lâmina escoada e de erosão em duas parcelas e três micro-bacias da bacia experimental de São João do Cariri. Os resultados da modelagem da erosão e da vazão serão mostrados mais adiante.

BACIA EXPERIMENTAL DE SÃO JOÃO DO CARIRI: BREVE HISTÓRICO E LOCALIZAÇÃO

Em contraponto a problemática da falta de dados observados de precipitação, vazão e erosão no semi-árido da Paraíba, em 1997, foi instalada nessa região a Bacia Experimental de São João do Cariri – BESJC, localizada na Mesorregião da Borborema. Essa bacia faz parte da bacia hidrográfica do rio Taperoá.

A BESJC possui uma área de aproximadamente 15 km², onde são coletadas séries de dados hidro-climatológicos dos mais diversos, com destaque especial para o monitoramento do escoamento superficial e da erosão medidos em parcelas e em microbacias para cada evento de chuva. As parcelas e as microbacias estão inseridas nesta bacia, a localização das parcelas da BESJC utilizadas no trabalho pode ser vista na Figura 3. Na BESJC, também se encontra instalada uma estação meteorológica completa, totalmente instrumentada para a coleta de dados meteorológicos.

A caracterização física da região onde se encontra a BESJC apresenta clima seco semi-árido, solos rasos, pouco porosos e predominantemente plásticos, subsolo derivado do embasamento cristalino, vegetação do tipo caatinga, relevo ondulado e altitude variando entre 450 m a 550 m. O curso d'água mais importante da bacia é o riacho Namorados, ao longo do qual estão localizados alguns açudes particulares. Contudo, esta alternativa da instalação das bacias experimentais pode ser umas das muitas soluções para se fazer a predição em bacias não instrumentadas e tentar conter o processo erosivo desencadeado em grande escala em toda a região do semi-árido.

MATERIAIS E MÉTODOS

Parcelas de erosão

Na Bacia experimental de São João do Cariri, em julho de 1998, foram instaladas parcelas de erosão da mesma maneira que foram instaladas na Bacia Experimental de Sumé (BES). A Tabela 1 apresenta as características de cada parcela, bem como o ano de início de operação.

Tabela 1. Características das parcelas de 100 m².

Parcela	Declividade Média (%)	Cobertura Vegetal	Período de Observação
1	3,4	Desmatada	a partir 1999
2	3,6	Vegetação rasteira Desmatada	a partir 1999 até 2000 A partir de 2001

Microbacias

Em junho de 2000, foi instalada a microbacia 1, a primeira na bacia representativa e em julho de 2001, foram encerradas as obras de instalação de duas novas microbacias (M2 e M3). As características relativas a cada microbacia estão apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2. Características das microbacias estudadas da BESJC

Microbacia	Área (ha)	Perímetro (m)	Declividade média (%)	Cobertura Vegetal
1	0,18	175	7,5	Desmatada
2	0,16	209	6,9	Com resto de caatinga
3	1,63	533	7,1	Com resto de caatinga

Dados coletados

Os dados de escoamento superficial lâmina escoada (mm) e a produção de sedimentos (kg/ha) vêm sendo coletados desde o início da implantação de cada unidade experimental. A coleta de dados na BESJC trata-se da continuidade dos procedimentos criados para a BES, tais como: coleta dos dados, análise e processamento dos dados com a criação de banco de dados hidrossedimentológicos. Portanto os procedimentos utilizados na BESJC são exatamente os mesmos utilizados na BES e descritos anteriormente.

Foi utilizado também o banco de dados coletados através do projeto IBESA – Instalação de Bacias Experimentais no Semi-árido (Srinivasan et al., 2004), em São João do Cariri, principalmente no caso das precipitações. No período de 1999 a 2006, foram coletados dados referentes aos 179 eventos para as parcelas, 160 eventos para a microbacia 1 e 116 eventos para as microbacias 2 e 3.

Discretização das microbacias

Para modelar os processos de escoamento superficial e produção de sedimentos em microbacias, inicialmente realizou-se a discretização das mesmas em elementos de planos e canais. Este processo de discretização não foi necessário para parcelas, uma vez que estas já são elementos do tipo plano.

As discretizações foram realizadas da seguinte maneira: inicialmente foi traçado o sistema de canais e em seguida, foram delimitadas as áreas que contribuíam para cada canal, sempre cruzando as curvas de nível perpendicularmente. Quando houve qualquer mudança de declividade, a área foi dividida em mais elementos, até que cada elemento plano ou canal ficasse o mais homogêneo possível. No caso das microbacias, o único critério utilizado foi a declividade (relevo), pois cada microbacia possui uniformidade de solo e vegetação.

As linhas de fluxo foram traçadas, acompanhando a declividade dos planos, comprimento dessas linhas de fluxo define o comprimento do plano. A largura do plano foi determinada como sendo a área do elemento dividida pelo comprimento do mesmo. O comprimento de cada canal é o mesmo medido no mapa, conservando assim, os comprimentos do sistema de drenagem da bacia. A declividade de cada elemento plano ou canal foi determinado como sendo a diferença de cota ao longo de seu comprimento dividido por esse comprimento. Os parâmetros que caracterizam o solo para as microbacias foram os mesmos utilizados para as parcelas.

Desta forma, a micro-bacia 1 foi discretizada em 30 planos e 14 canais, a micro-bacia 2 em 5 planos e 2 canais, e a micro-bacia 3 em 35 planos e 16 canais, conforme mostrado nas figuras 2 a 4. Estas figuras mostram a discretização dentro do modelo WEPP e correspondem as janelas do próprio modelo.

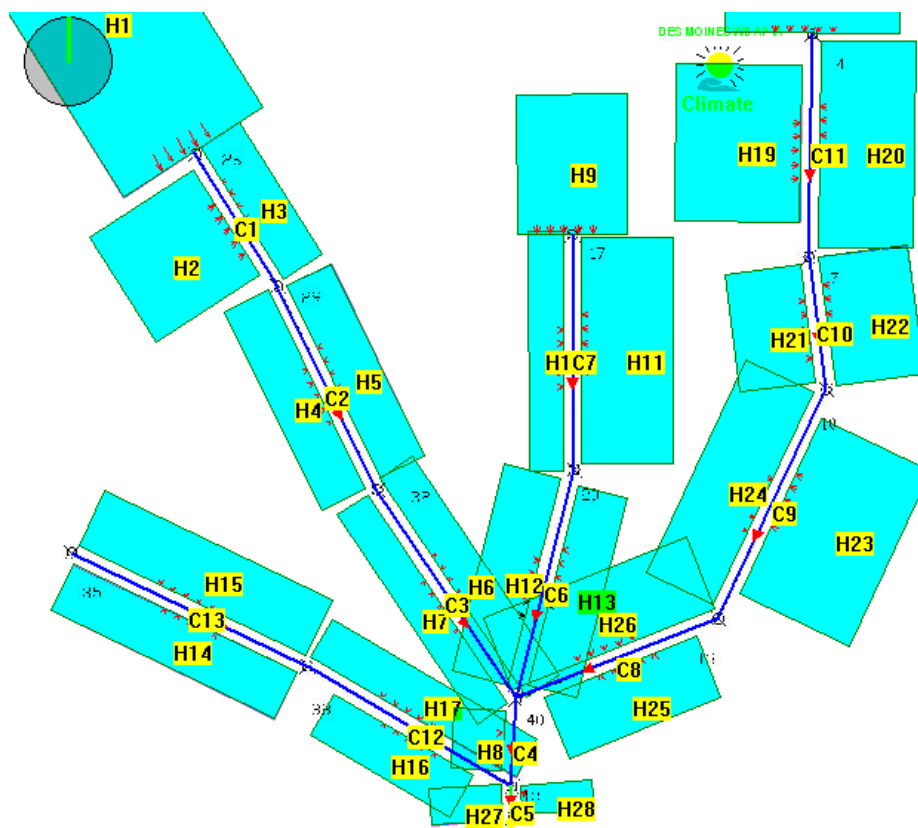


Figura 2: Discretização da microbacia 1.

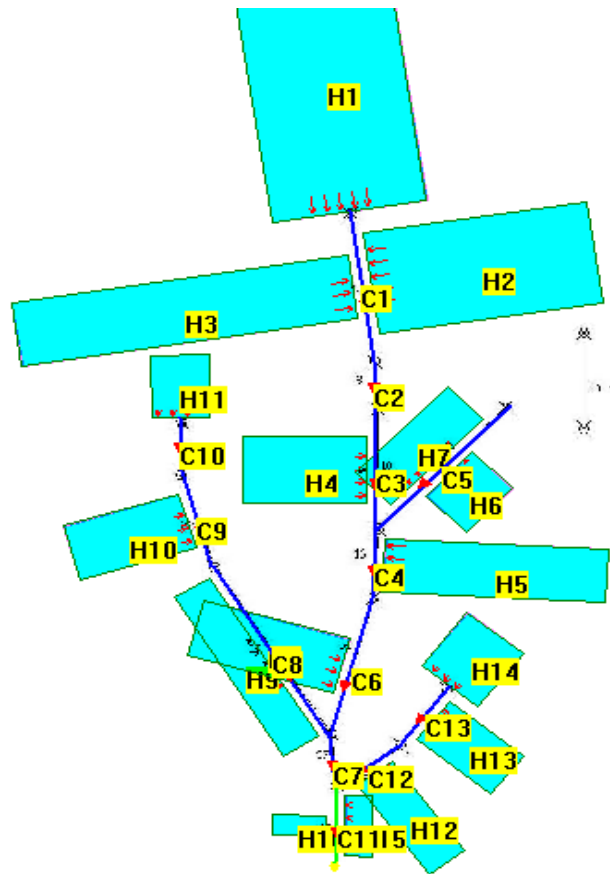
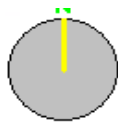


Figura 3: Discretização da microbacia 2.

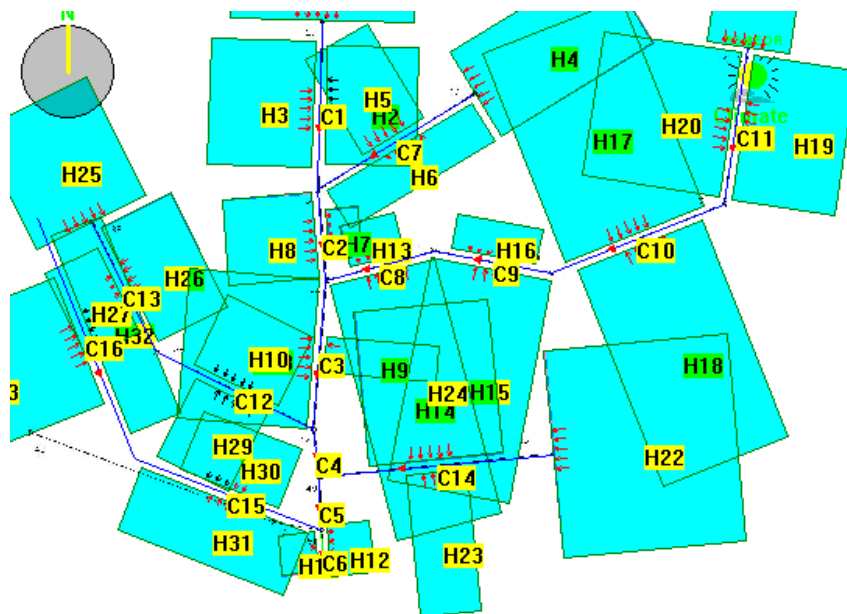


Figura 4: Discretização da microbacia 3.

Estimativa dos parâmetros físicos do solo

Esta etapa compreendeu a determinação dos valores dos parâmetros físicos do solo medidos através de ensaios laboratoriais e experimentos na própria bacia e encontram-se publicados em

Paiva (2008). Os parâmetros foram ajustados de acordo com as características físicas da bacia e do solo para todos os eventos de chuva.

No modelo WEPP, em uma fase preliminar, foram utilizados todos os dados das duas parcelas de erosão da BESJC e realizadas várias simulações fixando o valor do parâmetro K_s que foi otimizado em cada evento. Uma vez encontrados estes valores nas parcelas, eles foram mantidos fixos em todas as outras unidades experimentais da BESJC, utilizadas neste estudo.

A saturação inicial S_i é definido como θ_v/ϕ , onde θ_v é conteúdo volumétrico inicial da água por unidade do volume, e ϕ é a porosidade do solo. O modelo WEPP não considera a distribuição de água no solo nem mesmo sua redistribuição, como outros modelos hidrossedimentológicos. Mesmo assim o valor da saturação inicial foi determinado por calibração evento por evento, ajustando-o até que o volume escoado calculado se igualasse ao volume escoado observado.

De maneira semelhante, foi determinado o parâmetro K_i , que é o parâmetro que caracteriza a erodibilidade do solo nos planos. Este parâmetro exerce influência sobre a erosão que acontece entre o início do evento de precipitação e o tempo de empoçamento. O parâmetro K_r também varia de evento para evento, uma vez que a tensão de cisalhamento nos canais vai depender da condição do fluxo. Obtido o valor médio do parâmetro K_i para os planos nas etapas anteriores, o valor do parâmetro K_r para os canais foi calibrado também evento a evento, tentando minimizar a diferença entre o valor da erosão calculada e o valor da erosão observada em cada evento.

O Modelo de Vazão-Erosão

O modelo WEPP (*Water Erosion Prediction Project*, Flanagan e Nearing, 1995) é um modelo também distribuído, que simula um evento individual ou vários eventos de forma contínua, capaz de estimar a erosão ou a deposição de solo numa bacia. Este modelo é baseado nos princípios físicos dos processos inerentes à erosão do solo (física do solo, crescimento de plantas, infiltração e hidráulica do escoamento). Este modelo também considera os efeitos das mudanças de uso do solo e também modela a variabilidade espacial e temporal dos fatores que afetam os processos hidrológicos e da erosão que ocorrem em uma encosta.

O WEPP é um pacote de programas computacionais de simulação dos processos de erosão, desenvolvido através de um programa interinstitucional envolvendo diversas instituições norte-americanas; tais como: USDA e USDI, órgãos governamentais envolvidos na conservação de água e solo.

O conjunto de programas computacionais do WEPP permite a simulação contínua, ou seja, cada processo acontece em sua ordem, onde o fim de um processo dará início a outro processo, o qual prediz a perda de solo (ou a deposição).

Além do componente de erosão, o WEPP também inclui um componente climático, o qual usa um gerador de informações climáticas diárias; um componente hidrológico (que é baseado nas equações de Green-Ampt modificada por Mein e Larson para o processo de infiltração e a utilização de soluções das equações de ondas cinemáticas); um componente de balanço hídrico diário; um componente de crescimento de planta e decomposição de resíduos; e um componente de irrigação. O modelo WEPP calcula as distribuições espacial e temporal da perda de solo e sua deposição, além de fornecer estimativas explícitas de quando e onde, numa determinada bacia hidrográfica ou encosta, está ocorrendo erosão, de forma a possibilitar a adoção de medidas de conservação para controlar a perda de solo e a produção de sedimentos.

Para aplicação do WEPP é necessário o uso de dados climáticos diários, os quais nem sempre são facilmente disponíveis e, em função disto, o módulo CLIGEN (gerador climático estocástico) é utilizado para gerar os dados climáticos necessários. Para executar o programa CLIGEN é necessário fornecer o valor de 14 parâmetros que descrevem as condições climáticas locais, como a precipitação mensal do evento, a probabilidade mensal de ocorrência de dias com chuva após dias com chuva e ocorrência de dias sem chuva após dias com chuva, média e desvio padrão das temperaturas máxima e mínima mensal, média e desvio padrão da radiação solar mensal, média mensal da intensidade de precipitação máxima em 30 minutos, média mensal da temperatura do ponto de orvalho e a distribuição estatística do tempo decorrido do início do evento ao pico de intensidade máxima.

O WEPPSIE (*WEPP Surface Impoundment Element*) é a ferramenta do modelo na qual se encontram várias situações de terrenos (sulcos) (Foster e Lane, 1987). Para determinar o impacto do escoamento no sedimento transportado, o usuário necessita saber:

1. Ponto máximo do fluxo e do volume;
2. Ponto máximo concentração de sedimento e o total de sedimento produzido e
3. O tempo de encher sulco com sedimento.

Cálculo de Infiltração no modelo

O modelo WEPP utiliza a equação de Green e Ampt, (1911), para o cálculo de infiltração.

Escoamento sobre os Planos e canais

A equação da continuidade para um canal com entrada lateral de escoamento é:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q_c(x, t) \quad (1)$$

no qual A é a área da seção transversal (m^2), Q é a vazão no canal (m^3/s), e o $q_c(x, t)$ é o fluxo lateral por unidade de comprimento do canal (m^2/s). A aproximação cinemática está incorporada na relação entre a vazão no canal e a área de sua seção transversal sendo dada por:

$$Q = aR^{m-1} A \quad (2)$$

onde R é o raio hidráulico (m), $a = S^{1/2}/n$ e $m = 5/3$, onde S é a declividade e n é o coeficiente de rugosidade de *Manning*.

As equações cinemáticas de fluxo para os canais são resolvidas por uma técnica implícita definida em quatro pontos, similar àquela para o fluxo nos planos, com a diferença que a incógnita agora é a área A e não a profundidade do fluxo h , e que as mudanças geométricas devido à variação da profundidade devem ser consideradas.

Erosão nos Planos e Canais

Na modelagem para predição da erosão pelo programa WEPP, é utilizada a equação da continuidade para quantificação do transporte de sedimentos numa área, considerando-se condições de regime permanente, ou seja:

$$\frac{dG}{dx} = D_i + D_r \quad (3)$$

em que

G = carga de sedimentos, $M T^{-1} L^{-2}$;

x = comprimento da encosta, L ;

D_i = taxa de erosão de sedimentos nas áreas planas (entre sulcos) $M T^{-1} L^{-2}$; e

D_r = taxa de liberação de sedimentos nos sulcos ou canais, $M T^{-1} L^{-2}$.

A liberação de sedimentos nos canais é considerada independente de x e é sempre positiva. A erosão nos planos é positiva para desprendimento e negativa para deposição de sedimentos.

A taxa de liberação de sedimentos em áreas nos planos (D_i), usada nesse programa, pode ser calculada pela equação 3.35, proposta por Flanagan e Nearing, (1995). A erosão nos planos é semelhante à USLE/MUSLE

$$D_i = C_i K_i S_f I_p^2 G_e \quad (4)$$

em que

C_i = parâmetro que considera o efeito da cobertura vegetal na erosão dos canais, adimensional;

K_i = parâmetro que caracteriza a erodibilidade do solo nos planos, MTL^4 ;

- I_p = intensidade de precipitação, $L T^{-1}$;
 G_e = parâmetro que considera o efeito da cobertura do solo para erosão; e
 S_f = declividade de linha de atrito $L L^{-1}$, calculado em função da declividade da superfície e propriedades do fluxo.

A taxa de liberação de sedimentos em sulcos ou pequenos canais (D_r) é calculado para os casos em que a tensão cisalhante do escoamento exceder a tensão cisalhante crítica do solo e quando a carga de sedimentos for menor que a capacidade de transporte do escoamento. O valor de D_r pode ser obtido utilizando-se a equação apresentada por Tiscareno Lopez et al., (1994):

$$D_r = C_r K_r (\tau - \tau_c) \left(1 - \frac{G}{T_c} \right) \quad (5) \quad \text{em}$$

que:

- C_r = fator que considera a cobertura existente no plano, adimensional;
 K_r = parâmetro que caracteriza a erodibilidade do solo nos canais, $T L^{-1}$;
 τ = tensão cisalhante atuando nas partículas de solo em decorrência do escoamento, $M L^{-2} T^{-1}$;
 τ_c = tensão cisalhante necessária para a ocorrência da liberação de partículas, $M L^{-2} T^{-1}$ calculado internamente pelo programa em função da granulometria; e
 T_c = capacidade de transporte de sedimentos pelo escoamento, $M L^{-1} T^{-1}$.
 G = carga de sedimentos ($MT^{-1}L^{-2}$)

A velocidade de queda (V_f) da partícula é calculada através da relação seguinte:

$$V_f = \frac{D_r Q}{\beta(T_c - G)} \quad (6)$$

A capacidade de transporte de sedimento assim como a carga de sedimento é calculada numa base de largura do elemento plano, ou seja, por unidade de largura do canal. A carga de sedimento é convertida a uma base de largura de campo quando os cálculos são completados. A capacidade de transporte, T_c , em função de fluxo da tensão de cisalhamento é calculado usando uma equação simplificada de transporte da forma:

$$T_c = K_t \tau_f^{3/2} \quad (7)$$

Onde τ_f é a tensão de cisalhamento do solo (Pa), K_t é um coeficiente de transporte ($m^{0.5} \cdot s^2 \cdot kg^{-0.5}$) e a capacidade de transporte é calculada pela equação modificada de Yalin, (1963).

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Calibração do WEPP nas parcelas

A calibração é realizada em duas etapas: a calibração dos parâmetros de planos e a calibração dos parâmetros para os canais. Sendo a primeira realizada nas parcelas e a segunda nas microbacias.

Inicialmente pretendeu-se utilizar parte dos dados para calibração e parte para validação. Entretanto o número de eventos onde a calibração foi possível foi muito reduzido e, dessa forma utilizou-se todos os eventos para calibração.

Validação do WEPP nas parcelas

A validação foi realizada utilizando os valores médios de parâmetros calibrados evento a evento, e simulando o escoamento superficial e a erosão nos eventos separados para validação. Comparando os valores observados com os calculados de lâmina e erosão, a validação seria considerada como satisfatória ou não de acordo com a aproximação entre eles.

Como já foram explicados no item anterior todos os eventos foram utilizados para calibração e os mesmo eventos foram validados. A comparação da produção de sedimentos observada com a calculada no WEPP para as parcelas da BESJC está representada nas figuras 5 e 6.

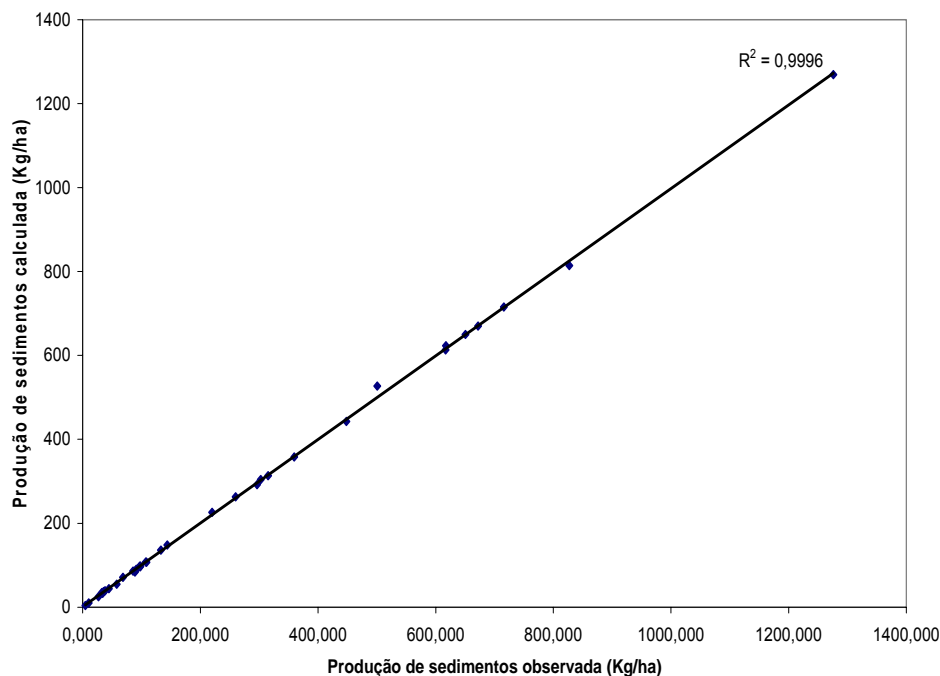


Figura 5. Comparação da produção de sedimentos observada com a calculada no WEPP - Parcela 1 de SJC.

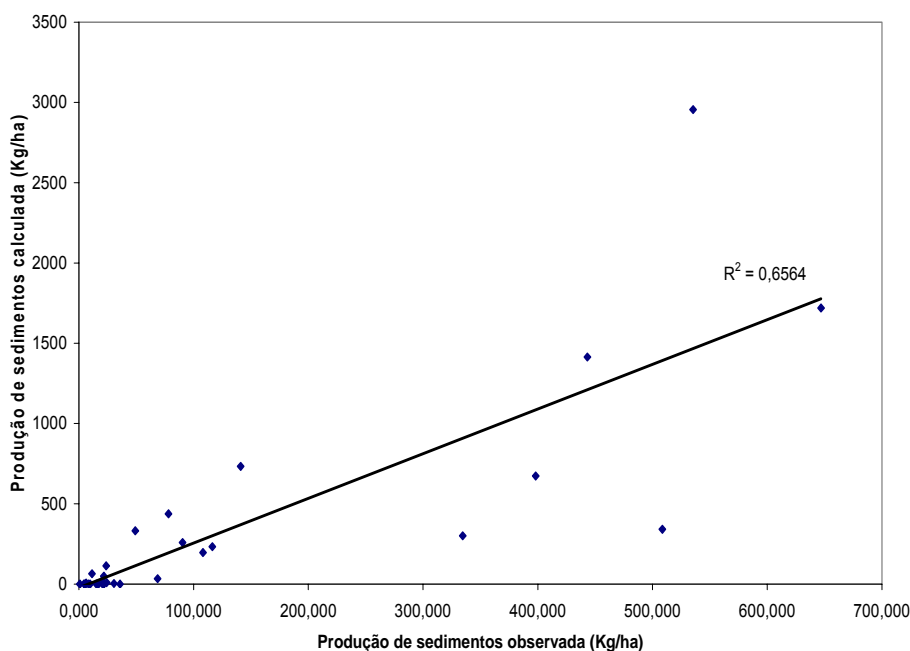


Figura 6. Comparação da produção de sedimentos observada com a calculada no WEPP - Parcela 2 de SJC.

Calibração do WEPP nas microbacias da BESJC

O mesmo procedimento empregado para as parcelas foi adotado nas microbacias, utilizando-se todos os eventos para calibração. A calibração da microbacia 1 pode ser observado na tabela 4, foram realizadas de forma semelhante a calibração das microbacias 2 e 3. Neste processo se observou que o modelo não conseguiu ser bem ajustado para as microbacias, produzindo resultados insatisfatórios, por este motivo não se realizou validação nas mesmas.

Tabela 4. Parâmetros calibrados do WEPP S_i , K_i e K_r – Microbacia 1 de SJC.
 $K_i = 10^4 \text{ kg.s/m}^4$ – $K_r = 0,0202 \text{ kg.m/N}^{1,5} \cdot \text{s}$ – $K_s = 2 \text{ m/s}$ – $\tau = 10$ – 2 camadas de solo

Cheia	data	chuva	L_o (mm)	L_c (mm)	S_i	E_o (kg/ha)	E_c (kg/ha)	E_c/E_o
19	22/2/2000	16,5	0,648	0,656	75,000	2,096	0,000	0,00
22	2/3/2000	7,9	1,671	1,667	87,000	19,824	0,000	0,00
23	19/3/2000	61,7	13,274	14,067	14,280	252,45	300,000	1,19
24	29/3/2000	23,2	4,385	5,000	14,280	62,14	100,000	1,61
25	30/3/2000	19,7	4,295	4,444	40,000	35,814	0,000	0,00
26	31/3/2000	35,6	8,189	10,556	14,280	117,12	100,000	0,85
27	1/4/2000	17,0	2,297	2,222	40,000	10,178	0,000	0,00
28	8/4/2000	21,1	4,082	4,444	30,000	25,094	0,000	0,00
29	11/4/2000	16,7	2,638	2,778	40,000	19,963	0,000	0,00
30	12/4/2000	56,8	16,190	26,111	14,280	8,345	0,000	0,00
31	16/4/2000	21,0	0,786	0,556	40,000	1,1041	0,000	0,00

Cont. Cheia	data	chuva	Lo (mm)	Lc (mm)	Si	Eo (kg/ha)	Ec (kg/ha)	Ec/Eo
36	18/5/2000	15,2	0,375	0,416	20,000	0,875	0,000	0,00
43	26/7/2000	12,0	0,868	0,921	14,280	1,543	0,000	0,00
44	2/8/2000	14,2	0,210	0,256	80,000	0,1869	0,000	0,00
51	11/3/2001	9,0	0,283	0,295	90,000	1,5433	0,000	0,00
54	27/3/2001	39,0	4,773	4,667	14,280	12,396	0,000	0,00
55	30/3/2001	24,2	0,636	0,689	14,280	24,189	0,000	0,00
57	2/4/2001	7,0	0,018	0,018	14,280	0,1197	0,000	0,00
60	27/6/2001	32,6	0,542	0,556	14,280	0,4175	0,000	0,00
71	4/1/2002	40,0	0,646	0,633	14,280	1,6787	0,000	0,00
73	10/1/2002	7,2	0,079	0,056	95,000	1,3791	0,000	0,00
81	13/2/2002	6,0	0,025	0,026	95,000	36,86	0,000	0,00
82	15/2/2002	62,4	10,956	10,222	14,280	0,363	0,000	0,00
83	4/3/2002	17,0	0,048	0,056	30,000	102,979	100,000	0,97
84	6/3/2002	55,5	11,391	18,222	14,280	0,3657	0,000	0,00
85	8/3/2002	4,0	0,045	0,000	95,000	74,879	100,000	1,34
88	6/5/2002	80,0	3,976	3,333	14,280	8,66	0,000	0,00
96	24/1/2003	3,2	0,042	0,042	95,000	0,65	0,000	0,00
99	12/2/2003	12,0	0,441	0,556	70,000	14,46	0,000	0,00
100	31/3/2003	9,0	0,102	0,106	14,280	1,05	0,000	0,00
101	21/4/2003	29,0	1,883	1,844	14,280	3,27	0,000	0,00
102	22/4/2003	6,0	0,461	0,480	95,000	7,20	0,000	0,00
104	2/5/2003	9,8	0,821	0,900	85,000	11,15	0,000	0,00
107	16/8/2003	82,6	2,004	2,444	14,280	41,39	0,000	0,00
109	14/1/2004	26,1	0,369	0,389	14,280	14,23	0,000	0,00
111	16/1/2004	20,3	1,240	1,311	75,000	12,58	0,000	0,00
102	22/4/2003	6,0	0,461	0,471	95,000	7,20	0,000	0,00
104	2/5/2003	9,8	0,821	0,911	85,000	11,15	0,000	0,00
107	16/8/2003	82,6	2,004	2,444	14,280	41,39	100,000	2,42
109	14/1/2004	26,1	0,369	0,389	14,280	14,23	0,000	0,00
111	16/1/2004	20,3	1,240	1,311	75,000	12,58	0,000	0,00
112	20/1/2004	75,6	15,650	18,889	14,280	146,92	200,000	1,36
113	22/1/2004	33,4	3,658	4,100	14,280	38,30	0,000	0,00
114	25/1/2004	61,6	14,220	15,778	14,280	100,37	100,000	1,00
116	27/1/2004	4,0	0,466	0,470	95,000	20,73	0,000	0,00
117	28/1/2004	14,8	1,882	1,967	75,000	45,55	0,000	0,00
119	30/1/2004	11,5	4,389	4,500	95,000	11,13	0,000	0,00
120	31/1/2004	12,1	0,346	0,456	60,000	0,90	0,000	0,00
121	3/2/2004	8,7	0,788	0,856	80,000	43,84	0,000	0,00
122	4/2/2004	61,0	31,150	39,444	14,280	46,61	100,000	2,15
124	12/2/2004	24,7	3,119	3,144	14,280	8,20	0,000	0,00
125	27/2/2004	17,0	1,949	2,222	30,000	8,78	0,000	0,00
126	28/2/2004	6,4	0,947	0,956	95,000	10,90	0,000	0,00
127	7/3/2004	58,8	5,305	5,333	14,280	19,99	0,000	0,00
133	15/7/2004	45,7	6,139	6,667	14,280	18,82	0,000	0,00
136	10/2/2005	28,1	0,369	0,410	14,280	2,92	0,000	0,00
137	17/2/2005	9,1	0,260	0,311	89,000	3,26	0,000	0,00

Cont. Cheia	data	chuva	Lo (mm)	Lc (mm)	S_i	Eo (kg/ha)	Ec (kg/ha)	Ec/Eo
140	28/3/2005	16,0	0,368	0,356	30,000	4,26	0,000	0,00
141	29/3/2005	36,0	7,080	9,778	14,280	6,70	0,000	0,00
144	25/4/2005	29,3	10,295	10,556	55,000	17,66	0,000	0,00
145	26/4/2005	30,1	9,470	10,556	30,000	19,85	0,000	0,00
146	28/4/2005	38,4	11,042	11,889	14,280	30,03	0,000	0,00
147	4/5/2005	61,0	23,006	25,556	14,280	72,17	100,000	1,39
152	18/6/2005	10,5	0,394	0,420	70,000	2,38	0,000	0,00
155	5/12/2005	84,0	34,108	36,111	14,280	90,24	100,000	1,11
156	6/12/2005	14,0	4,750	5,000	95,000	25,55	0,000	0,00
157	7/12/2005	7,1	1,230	1,556	90,000	15,28	0,000	0,00
158	16/2/2006	61,5	23,523	24,667	14,280	32,15	0,000	0,00
167	24/4/2006	10,1	0,630	0,656	80,000	6,04	0,000	0,00
172	13/5/2006	15,3	2,600	2,778	65,000	67,35	100,000	1,48
178	21/6/2006	32,8	10,452	10,556	35,000	55,14	100,000	1,81
R²:							0,853	

Lo = Lâmina observada, Lc = Lâmina calculada, Eo = Produção de sedimento observado, Ec = Produção de sedimentos calculada e S_i = Saturação inicial do solo.

Análise e discussão dos resultados do modelo WEPP

Utilizou-se o modelo WEPP para modelar os processos hidrossedimentológicos nas parcelas e microbacias da BESJC. Devido à natureza mais complexa da parametrização do WEPP, os processos de calibração foram para muitos eventos insatisfatórios.

O processo de calibração consistiu-se de três etapas. Foram definidos, na primeira etapa, os parâmetros de condutividade hidráulica saturada efetiva (K_s) e a tensão de resistência ao cisalhamento (τ). Estes parâmetros foram definidos através de várias simulações e testes de sensibilidade.

Fixados os parâmetros determinados através de testes de sensibilidade, realizou-se a calibração da saturação inicial que afeta diretamente a lâmina escoada para as parcelas 1 e 2 da BESJC, na qual foi possível conseguir resultados satisfatórios, com lâminas simuladas bastante próximos das observados. A saturação inicial no WEPP foi calibrada evento a evento, sendo que, nas microbacia com algumas dificuldades.

De maneira semelhante, foi determinado o parâmetro K_i , que é o parâmetro que caracteriza a erodibilidade do solo nos planos entre os sulcos. Este parâmetro exerce grande influência sobre a erosão que acontece entre o início do evento de precipitação e o tempo de empoçamento. O parâmetro K_r também varia de evento a evento, uma vez que a tensão de cisalhamento nos canais vai depender da condição do fluxo. Obtido o valor médio do parâmetro K_i para os planos nas etapas anteriores, o valor do parâmetro K_r para os canais foi calibrado evento a evento. Os dois parâmetros ligados à produção de sedimentos foram determinados através de muitas tentativas, e em muitos

eventos a calibração foi totalmente insatisfatória, por este motivo, todos os eventos foram utilizados para conseguir a calibração num número razoável de eventos. Assim, nas duas parcelas de SJC conseguiu-se uma calibração razoável dos parâmetros. Analisando a validação obtive-se valores para o coeficiente de correlação linear (R^2) razoáveis o que mostra a sua tendência, sendo R^2 igual a 0,999 de para a parcela 1 e 0,933 de para a parcela 2.

Nas microbacias foi realizado o mesmo processo de calibração realizado nas parcelas para lâmina escoada e produção de sedimentos, porém os resultados se diferenciaram das parcelas com relação a produção de sedimentos. Para a lâmina escoada os resultados se mostraram promissores, e foi possível ajustar o valor de S_i para obter a lâmina calculada bem próxima à observada.

Para a produção de sedimentos, nos eventos para os quais o valor observado foi muito pequeno, o modelo não conseguiu simular bem a produção, uma razão para este fato é que o modelo tem limitação de precisão, ou seja, o menor valor considerado na produção de sedimentos é 100 kg/ha. Nos casos em que a produção é no máximo 50 kg/ha, este valor no modelo é zero, nos casos em que a produção está no intervalo de 50 a 100 kg/ha, o valor se torna 100 kg/ha. Para as unidades da BESJC, apesar de encontrar-se em uma região sensível a erosão, os solos erodem relativamente pouco, e a produção de sedimentos é pequena, e em muitos casos bem menores que 100 kg/ha.

O modelo WEPP, por natureza das equações de erosão inerentes gera grandes produções de sedimentos em canais. Mesmo com estes resultados não satisfatórios para a calibração do modelo conseguimos valores de R^2 razoáveis, para quase todas as microbacias de SJC, com valores de R^2 de 0,853 para microbacia 1, de 0,872 para a microbacia 2 e de 0,919 para a microbacia 3. Observa-se que para a microbacia 2 obteve-se um valor da correlação (R^2) insatisfatório. Uma explicação seria a grande quantidade de eventos com valor de erosão muito pequeno o que pela aproximação do modelo que já foi descrita anteriormente traz os valores pequenos para zero.

CONCLUSÕES

O modelo WEPP apesar de possuir um vasto banco de dados interno, o que facilita a parametrização, apresentou-se como um modelo não muito eficiente para modelar erosões na Bacia Experimental de São João de Cariri e especialmente quando a produção é pequena.

O modelo WEPP representou bem o escoamento e apenas razoavelmente bem a produção de sedimentos nas parcelas, porém nas microbacias enquanto simulou razoavelmente bem o escoamento, na simulação da produção de sedimento apresentou grandes discrepâncias.

É imperativo a investigar a eficiência e confiabilidade no modelo WEPP em outras bacias, principalmente nas bacias maiores que demonstrem problemas de grande erosão, uma vez que neste estudo, o modelo não apresentou uma precisão adequada para simular bem a produção, relativamente pequena, de sedimentos.

Contudo as camadas de solo do semi-árido são muito rasas e o pouco que erode destrói as camadas de nutrientes do solo, comprometendo a produtividade das mesmas. Desta forma, a modelagem do processo que resulte em boas estimativas da produção de sedimentos na região semi-árida deve ser perseguida.

AGRADECIMENTOS

Os autores deste trabalho agradecem ao CNPq, CAPES e Projeto BEER/FINEP pelos incentivos proporcionados através dos auxílios financeiros e das bolsas de mestrado para a realização desta pesquisa.

REFERÊNCIAS

AMORE, E.; MODICA, C.; NEARING, M. A. & SANTORO, V. C. (2004). Scale effect in USLE and WEPP application for soil erosion computation from three Sicilian basins. *Journal of Hydrology* 293, p. 100–114.

BEVEN, K. J., & MOORE, I. D. (1993). Terrain analysis and distributed modeling in hydrology.

COGO, N. P. LEVIEN, R. (2003). SCHWARZ, R. A. Perdas de solo e água por erosão hídrica influenciadas por métodos de preparo, classes de declive e níveis de fertilidade do solo. *Rev. Bras. de Ciênc. do Solo* vol.27 n. 4, Viçosa, julho-agosto.

FLANAGAN, D.C. e NEARING, M.A. (1995). USDA-Water Erosion Prediction Project: Hillslope Profile and Watershed Model Documentation. NSERL Report No. 10. USDA-ARS National Soil Erosion Research Laboratory. West Lafayette, Indiana.

FOSTER, G. R., HUGGINS, L. F., AND LANE, L. D. (1963). Simulation of Overland Flow on Short Field Plots. *Water Resources Research*. 1968 Vol. 4, N° 4, N°6, p. 1179 – 1187.

GREEN, W. H. e AMPT, G. A. (1911). *Studies on Soil Physics*, 1. The Flow of Air and Water Through Soils. *Journal Agr. Sci.*, 4(1): 1-24.

GUERRA, A. J. T. M. Processos erosivos nas encostas. (1998). In: Guerra A. J. T. e Cunha, S. B (orgs.). *Geomorfologia: uma atualização de bases e conceitos*. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, cap. 4, p.149-210.

GUERRA, A. J. T. e BOTELHO, R. G. M. Erosão dos solos. (1998). In: Cunha, S. B. e Guerra, A. J. T. (orgs.) *Geomorfologia do Brasil*. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil. cap. 5, p.181-228.

KIRKBY, M. J. (1980). Modeling water erosion processes. In: KIRKBY, M. J. E MORGAN, R. P. C. (orgs.) *Soil erosion*. Londres, p.183-216.

LAL, R. (1990). *Soil erosion in the tropics - principles and management*. McGraw-Hill.

PAIVA, F. M. L. (2008). Estudo comparativo entre três modelos de base física na modelagem hidrossedimentológica em microbacias na região sem-árida paraibana. PPGECA/CCT/UFCG, Campina Grande.

SINGH, V. P. (1995). Computer models of watershed hydrology. Water Resources Publications.

VANONI, V. A. (1970). Chairman, task committee on preparation of manual on sedimentation, sediment engineering, J. Hydraul. Div. Amer. Soc. Civil Eng., 96(HY6), p. 1283-1331.

YU, L.; RIGHETTO, A. M.; MARTINS, R.P.; ROSMAN, P. C. C. E EIGER, S. (1999). Métodos numéricos em recursos hídricos. Rio de Janeiro; Associação Brasileira de Recursos Hídricos. Vol. 1, 2, 3 e 4.

WISCHMEIER, W. H. (1960). Cropping-management factor evaluation for a universal soil-loss equation. Soil science society of American Proc. 24(4), p. 322-326.

WISCHMEIER, W. H. (1976). Use and misuse of the universal soil-loss equation. Journal of soil and water conservation, 31(1), p. 5-9.