

PARAMETRIZAÇÃO DO MODELO WEPP EM DUAS SUB-BACIAS DO SEMI-ÁRIDO PARAIBANO

*Laércio Leal dos Santos¹; Fernanda Maria. L. Paiva¹ Vajapeyam S. Srinivasan²;
Ricardo de Aragão³ & Itamara Mary L. M. Taveira⁴*

RESUMO – Os modelos de base física, principalmente aqueles que simulam os processos da erosão pela chuva, são ferramentas muito úteis para fornecer informações sobre o impacto que os diversos usos do solo exercem sobre os processos de escoamento superficial e a produção de sedimentos em bacias hidrográficas devido a um evento de precipitação. Entretanto, dada a diversidade de modelos existentes, faz necessário identificar o mais adequado para a região de estudo. Neste sentido, dados de duas sub-bacias (SB1-0,32 km² e SB2 - 0,59 km²) instaladas na Bacia Experimental de São João do Cariri, no semi-árido paraibano, foram utilizados para calibração dos parâmetros mais sensíveis do modelo hidrossedimentológico WEPP (*Water Erosion Prediction Project*) desenvolvido para ser aplicado a diversas condições de solo e clima. Os resultados demonstram que o modelo WEPP permite simular bem o escoamento superficial, porém, possui pouca precisão para simular o processo erosivo em bacias de pequenas dimensões.

ABSTRACT – Physically based models, mainly those which simulate the erosion process resulting from natural rainfall are useful tools to provide information about the impact of land use change on the runoff and sediment yield from a watershed. However, due to the wide diversity among these types of models, it is necessary to identify the one that is appropriate for the region under consideration. With this in mind, data from two sub-basins (SB1-0,32 km² e SB2 - 0,59 km²) installed within the Experimental Basin of São João do Cariri in the semiarid region of State of Paraíba were used to calibrate the most sensitive parameters of the model WEPP (*Water Erosion Prediction Project*). The findings show that the model could simulate well the observed runoff, but could not provide equally good results for the erosion process at this scale of the basin.

Palavras-chave – Parametrização, Modelos Hidrossedimentológicos, Erosão.

1) Doutorandos 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 / (83) 8812 - 7312. E-mail: laercioeng@yahoo.com.br, fernandamlpaiva@yahoo.com.br

2) Professor Titular da UAEC/CTRN/AERH/UFCG – Campus I, Campina Grande, CEP 58109-970, Campina Grande, PB. Fone: (83) 310 1157 – Fax: (83) 310 1388. Email: vajapeyam@yahoo.com

3) Professor Adjunto do DEC/CCT/UFS - Cidade Universitária Prof. José Aloísio de Campos. Av. Marechal Rondon, s/n Jardim Rosa Elze CEP 49100-000 São Cristóvão – SE. E-mail: ricardoaragao@yahoo.com

4) Aluna Iniciação Científica (PIBIC). UAEC/CTRN/AERH/UFCG – Campus I, Campina Grande, CEP 58109-970, Campina Grande, PB. Email: itamaramary@gmail.com

1 - INTRODUÇÃO

As bacias hidrográficas nordestinas, principalmente aquelas situadas na porção semi-árida, têm sido degradadas ao longo de décadas devido à extensiva atividade antrópica como a retirada da vegetação nativa e o uso irracional do solo para agricultura e a pecuária. Esta atividade, aliada ao regime de precipitação da região, têm contribuído para o aumento da quantidade de sedimentos que são transportados para canais e reservatórios superficiais de armazenamento de água para consumo. Esta carga excessiva de sedimentos provoca uma série de problemas dentre eles, o assoreamento e a conseqüente redução na capacidade de armazenamento, como também a degradação da qualidade da água armazenada, o que exige maiores investimentos no que diz respeito ao tratamento (Aragão *et al*, 2002a,b).

O processo erosivo constitui-se na principal causa de degradação dos solos, trazendo, como conseqüência, prejuízos ao setor agrícola e ao meio ambiente, com reflexos não só econômicos, mas também sociais. Dentre os problemas que são resultantes do processo erosivo, provavelmente, o mais maléfico seja a própria perda de solo, uma vez que a natureza leva cerca de 100 anos para formar uma camada de solo de um cm de espessura (Bennett, 1974), a qual, muitas vezes, poderá ser perdida com uma única chuva. Sendo assim, para o manejo integrado das bacias hidrográficas faz-se, necessário o conhecimento sobre o escoamento superficial gerado e a conseqüente erosão do solo devido aos eventos naturais da chuva.

Diversas metodologias têm sido empregadas para quantificar o escoamento superficial e a produção de sedimentos de uma bacia hidrográfica devido a chuvas naturais, e dentre elas o emprego de modelos de base física (Singh, 1995; Beven, 2007), particularmente os hidrossedimentológicos, têm crescido em preferência devido ao fato dos mesmos fornecerem informações não só sobre o escoamento superficial, como também sobre a carga de sedimentos devido ao evento de precipitação e também por considerar as variações espaço-temporais no uso do solo. Entretanto, dada a diversidade de modelos de base física e a dificuldade intrínseca para a calibração ou estimativa dos valores dos seus parâmetros, uma etapa fundamental no processo de quantificação dos impactos antrópicos é a identificação de um modelo adequado para cada região/escala o que pode ser efetuada utilizando-se dados observados proveniente da região que se quer estudar.

Visando a quantificação dos impactos das ações antrópicas sobre os processos de escoamento e produção de sedimento e a identificação de um modelo hidrossedimentológica adequado para a região do cariri paraibano, dados obtidos na Bacia Experimental de Sumé (Srinivasan e Galvão, 2003), e na Bacia Experimental de São João do Cariri (BESJC) têm sido utilizados para calibração de modelos de base física (Srinivasan e Galvão, 1995; Aragão 2000; Srinivasan e Cruz, 2005;

Santos, 2008). Dentre os modelos testado o modelo WEPP - Water Erosion Prediction Project – (Flanagan e Nearing, 1995) mostrou-se bastante promissor visto que foi desenvolvido para ser aplicado às bacias sujeitas a várias condições de uso do solo e clima inclusivo o clima semi-árido, tornando este modelo propício para o presente trabalho.

Sendo assim, o objetivo deste trabalho é a verificação da parametrização e desempenho deste modelo quando aplicado a duas sub-bacias da BESJC (SB1 com área de 0,59 km² e SB2 com área de 0,32 km²).

2 – ÁREA DE ESTUDO

A Bacia Experimental de São João do Cariri (BESJC) encontra-se localizada na região do cariri paraibano é drenada pelo Riacho dos Namorados e se encontra numa região cuja precipitação média anual é de 400 mm. O período chuvoso acontece entre março e junho, o solo é raso do tipo areno argiloso, e o embasamento rochoso aflora em várias partes da bacia, favorecendo o escoamento superficial rápido, principalmente nas áreas onde a vegetação nativa foi removida. Esta vegetação é do tipo caatinga arbustiva arbórea e, nas ultimas décadas tem sido removida para a utilização em indústrias de panificação, olarias, carvoarias, dentre outras atividades.

Visando a caracterização hidroclimatológica da região e a coleta de dados hidrossedimentológicos em diferentes escalas foram instalados nesta bacia diversos equipamentos e experimentos tais como (Figura 1): duas estações climatológicas, pluviômetros, pluviógrafos, duas parcelas de erosão (P1 e P2), três micro-bacias (M1, M2 e M3), quatro sub-bacias (SB1, SB2, SB3 e SB4) e linígrafos automáticos instalados nas seções das sub-bacias.

No presente trabalho, foram utilizados dados de escoamento superficial e produção de sedimento de duas sub-bacias (SB1 à SB2). Além disso, as informações de chuva são provenientes de um pluviógrafo instalado nas proximidades dos experimentos. As características das unidades experimentais aqui utilizadas serão mostradas a seguir.

2.1 – Sub-bacia 1

Para o registro das cheias de tributários do riacho principal, o riacho dos Namorados, foi instalado, em 1985, um vertedor triangular de soleira espessa (Figura 1) em uma seção do riacho, cuja área de contribuição é 0,59 km² (área da SB1). Neste vertedor foram instalados um linígrafos uma régua de máxima e uma régua linimétrica. Nesta bacia, o processo de erosão está em franca expansão tendo sido identificadas ravinas e voçorocas, o que pôde ser observado através de várias visitas a área da SB1. Também foi constatado o franco alargamento do canal principal ao longo de todo o seu percurso, chegando a mais 2,5 m nas partes mais baixas da bacia e em outros pontos.

críticos, e a uma profundidade muitas vezes superior a 1 m nas áreas mais afastadas da foz (Aragão, 2006). A vegetação nesta bacia esta bastante degrada sendo encontradas com facilidades áreas completamente desmatadas e com afloramento rochoso, o que facilita o escoamento superficial.



Figura 1 - Vertedor da SB1.

2.2 - Sub-bacia 2

Concomitante com a instalação do vertedor da SB1, em 1985, também foram iniciados os trabalhos de implantação da sub-bacia 2 (SB2), sendo construído para tanto, um vertedor composto (triangular + retangular), de soleira delgada, cuja área de contribuição é 0,32 km² (Figura 2). A SB2 possui uma vegetação nativa relativamente conservada, se comparada a da SB1, e, para uma dada precipitação, observa-se o efeito protetor da vegetação para o solo que diminui, de maneira significativa, a produção de sedimentos. A Figura 3 apresenta a delimitação das sub-bacias citadas com as curvas de nível.



Figura 2 - Vertedor da SB2.

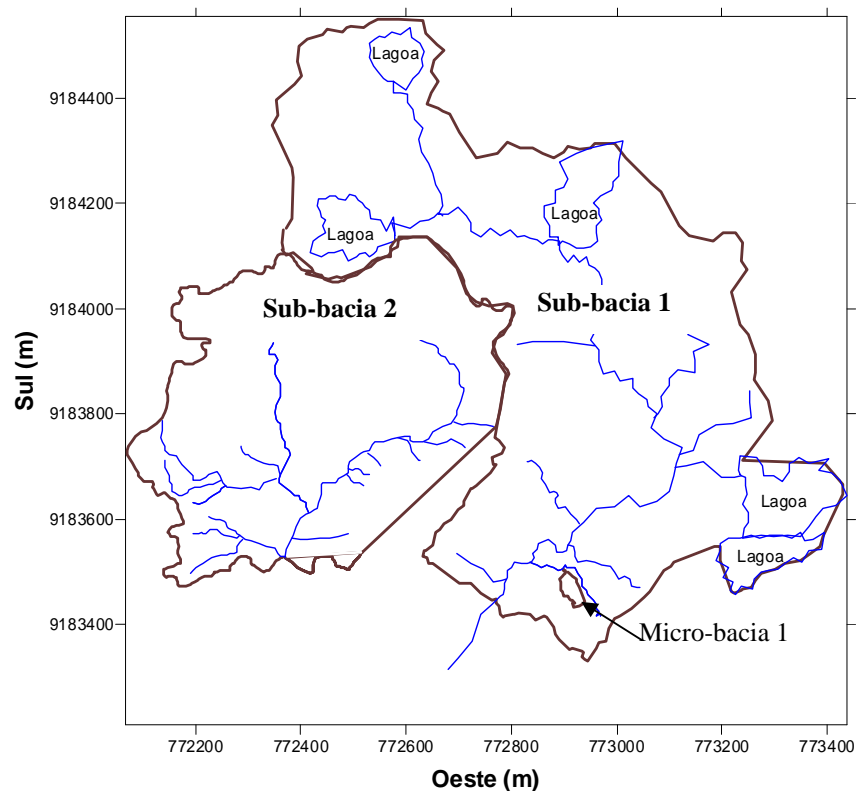


Figura 3 - Delimitação da SB1 e SB2

3 - MODELO WEPP

O modelo WEPP (*Water Erosion Prediction Project* - Flanagan e Nearing (1995)) é um modelo hidrossedimentológico, distribuído, de base física, contínuo/orientado a evento, que simula os processos de infiltração, escoamento superficial e erosão do solo. A bacia é representada (discretizada) no modelo como uma cascata de planos e de canais, procurando representar, da melhor maneira possível, a distribuição de vertentes e canais naturais no interior da bacia. A seguir, serão descritas as principais equações utilizadas pelo modelo e os parâmetros a estas relacionadas.

3.1 - Modelo de Infiltração

No modelo WEPP a infiltração, para uma chuva não permanente, é simulada através do modelo de infiltração de Green-Ampt (1911). Esta equação baseia-se em uma série de experiências de laboratório em colunas de solo, tendo uma base teórica e é de uso geral. Com base nas modificações propostas por Mein e Larson (1973), para modelar a infiltração durante uma chuva não permanente, a equação e infiltração assume a seguinte forma:

$$f_c = K_e t_c \Psi \theta_d \ln \left[1 - \frac{f_c}{\Psi \theta_d} \right] \quad (1)$$

onde f_c é a taxa de infiltração (m/s), K_e é a condutividade hidráulica efetiva saturada (mm/h), t_c é a correção da diferença entre o tempo instantâneo e o tempo atual de empoçamento, θ_d é o déficit de umidade na mistura de solo ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) e Ψ é o potencial capilar médio (m).

Desta forma o índice médio de infiltração, f_i ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$), para um intervalo é calculado como:

$$f_i = \frac{F_i - F_{i-1}}{t_i - t_{i-1}} \quad (2)$$

onde os subscritos i e $i-1$ referem-se à intervalos correntes e prévios de tempo, respectivamente, F é a profundidade cumulativa de infiltração (m) e t é o tempo (s).

O déficit de umidade na mistura de solo é calculado como:

$$\theta_d = \eta_e - \theta_v \quad (3)$$

onde η_e é a porosidade efetiva (m^3/m^3) e θ_v é o conteúdo volumétrico inicial da água por unidade de área (m^3/m^3).

A infiltração cumulativa é calculada usando o modelo de Mein e Larson (1973), e o de Green-Ampt Mein-Larson (GAML) como apresentado por Chu (1978) para o caso de intensidade de chuva incidente em um determinado ponto de alagamento.

Segundo Nearing *et al.* (1995), uma das vantagens da equação de Green-Ampt, em relação às soluções numéricas da equação de Richards, é que não há nenhum problema de estabilidade em sua solução, sendo muito mais fácil aplicá-la do que a solução numérica da equação de Richards. Outra vantagem, é sua aplicabilidade em diferentes condições iniciais e perfil do solo (CHU, 1978).

A equação de Green-Ampt foi desenvolvida considerando-se que, desde o início do processo de infiltração, a superfície do solo se encontra saturada e que existe uma carga hidráulica sobre a superfície do solo. Esta situação, entretanto, não corresponde às condições de infiltração que ocorrem sob precipitações naturais, pois, antes deste processo, deveria ocorrer a saturação da camada próxima à superfície e o empoçamento de água sobre a superfície do solo.

Chu (1978) desenvolveu um indicador, denominado de C_u (m) (Equação 4), para determina em que intervalo de tempo ocorre o ponto de empoçamento. Se C_u é positivo, o empoçamento ocorre dentro do intervalo de intensidade, o tempo para o empoçamento dentro deste intervalo será

calculado e, a partir daí, começa o escoamento superficial. Se for negativo, não há excesso da precipitação gerada no intervalo. O indicador é dado por:

$$C_u = R_i - V_i - \left[\frac{K_e \Psi \theta_d}{r_{i-1} - K_e} \right] \quad (4)$$

onde R é a altura da chuva acumulada (m), V é a altura do excesso de chuva acumulada (m), K_e é a condutividade hidráulica efetiva saturada (m/s), Ψ é o potencial capilar médio (m), θ_d é o déficit de umidade na mistura de solo (m/m), e r é a taxa de chuva média (m/s). A altura de excesso de chuva acumulado é calculada por:

$$V_i = R_i - F_i \quad (5)$$

O indicador para o fim de alagamento no elemento durante um intervalo, admitindo que a superfície estivesse alagada no início do intervalo, é dado por:

$$C_p = R_i - F_i - V_i \quad (6)$$

onde C_p (m) é positivo para o caso de alagamento contínuo e negativo para alagamento cessado no intervalo. Quando o excesso da chuva termina dentro do citado intervalo, a infiltração acumulada é calculada como:

$$F_i = R_i - V_{i-1} \quad (7)$$

3.2 - Escoamento sobre os Planos

Visto em uma escala muito pequena, o fluxo nos planos é um processo tridimensional extremamente complexo. Numa escala maior, entretanto, pode ser visto como um processo unidimensional onde se pode aplicar a seguinte equação:

$$q = \alpha h^m \quad (8)$$

onde q é a descarga por unidade de largura (m^2/s) e h é o volume de água armazenado por unidade da área (m). Os parâmetros α e m são dados por: α é $C(S_0)^{0.5}$ onde C é o coeficiente de Chezy ($m^{0.5}/s$) e S_0 é a declividade e m é igual a 1,5.

A Eq. (8) é utilizada juntamente com a equação da continuidade, Eq. 9

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = v \quad (9)$$

onde t é o tempo (s), x é a distância ao longo do sentido da declividade, e v é o excesso de precipitação (m/s).

Para a modelagem do fluxo nos planos, a Eq. (8) é substituída na Eq. (9), onde se obtém:

$$\frac{\partial h}{\partial t} \square \alpha m h^{m-1} \frac{\partial h}{\partial x} = v \quad (10)$$

3.3 - Fluxo nos Canais

A equação da continuidade para um canal com entrada lateral de fluxo é dada por:

$$\frac{\partial A}{\partial t} \square \frac{\partial q}{\partial x} = Q \quad (11)$$

onde A é a área da seção transversal (m^2), q é a vazão no canal (m^3/s), e o Q é o fluxo lateral por unidade de comprimento do canal (m^2/s).

A relação entre a vazão no canal e a área de sua seção transversal é dada por:

$$Q = \alpha R^{m-1} A \quad (12)$$

onde R é o raio hidráulico (m), α é $C(S_0)^{0.5}$ sendo S_0 é a declividade e C é o coeficiente de Chezy e m é igual a 1,5.

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.

3.4 - Erosão nos Planos e Canais

A modelagem da erosão no WEPP é realizada através da equação da continuidade para quantificação do transporte de sedimentos numa área, considerando-se condições de regime permanente, ou seja:

$$\frac{dG}{dx} = D_i \square D_r \quad (13)$$

onde G é a carga de sedimentos, x é o comprimento da encosta, L , D_i é a taxa de erosão de sedimentos nas áreas planas (entre sulcos) $M T^{-1} L^{-2}$, D_r é a 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 14, proposta por Flanagan e Nearing (1995).

$$D_i = C_i K_i S_f I_p^2 G_e \quad (14)$$

onde C_i é o parâmetro que considera o efeito da cobertura vegetal na erosão dos canais, adimensional, K_i é o parâmetro que caracteriza a erodibilidade do solo nos planos, $M T L^4$; I_p é a intensidade de precipitação, $L T^{-1}$, G_e é o parâmetro que considera o efeito da cobertura do solo para erosão e S_f é a 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):

$$D_r = C_r K_r \left[\tau - \tau_c \right] \left[1 - \frac{G}{T_c} \right] \quad (15)$$

onde C_r é um fator que considera a cobertura existente no plano, adimensional, K_r é o parâmetro que caracteriza a erodibilidade do solo nos canais, $T L^{-1}$, τ é tensão cisalhante atuando nas partículas de solo em decorrência do escoamento, $M L^{-2} T^{-1}$, τ_c é a 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 é capacidade de transporte de sedimentos pelo escoamento, $M L^{-1} T^{-1}$.

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

$$V_f = \frac{D_r Q}{\beta T_c - G} \quad (16)$$

A capacidade de transporte de sedimento, assim como a carga de sedimento, é calculada numa base de largura do elemento plano. 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 calculada usando uma equação simplificada de transporte da forma:

$$T_c = K_t \tau_f^{3/2} \quad (17)$$

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

A equação de Yalin para sedimento não uniforme foi descrita por Foster (1982). Essas equações foram modificadas em dois meios, com o objetivo de melhorar a representação entre as diferenças na capacidade de transporte com as características de tamanho de partícula do solo. Estas modificações são baseadas em provas extensas efetuadas com o modelo de WEPP para vários tipos de solo e dados medidos de erosão de campo.

Para a aplicação da equação de Yalin, como descrito por Foster (1982), a capacidade de transporte de sedimento, para cada uma das classes de tamanho de partícula do solo, é somada para obter a capacidade total de transporte de sedimento. Usando este método existe uma diferença pequena nas características calculadas de sedimento, que foram limitadas na densidade e para diâmetro dos agregados. Em outras palavras, dois solos com distribuição granulométrica diferente, mas com essencialmente o mesmo tamanho e densidade de agregado, possuiriam diferença pequena na capacidade total de transporte de sedimento. Dessa forma, a modificação incluída no WEPP usa uma média ponderada da capacidade de transporte de sedimento para cada classe de tamanho de partícula, onde esta é função da fração de massa de sedimento dentro de cada classe.

3.5 - Arquivo de chuva de Entrada do Modelo WEPP

Para a utilização do modelo WEPP faz-se necessária a disponibilidade de informações referentes à bacia a que se quer modelar, bem como da chuva que gerou o escoamento/erosão a ser calculados. Nos casos onde existem informações climatológicas que cobrem um longo período, o modelo permite a criação de um arquivo relativo à estação climatológica onde conterà informações sobre temperatura, velocidade do vento, horas de insolação diária, dentre outras. Entretanto, no presente caso, alguns dados não estavam disponíveis e, nestas condições, optou-se por utilizar a estrutura de arquivos de chuva gerada a partir dos dados relativos à estação climatológica DES MOINES WB AP IA, no Estado de Iowa nos EUA, com os dados da BESJC (Figura 5).

Vale salientar que o WEPP poderá simular um evento isolado ou um período de evento (modo contínuo) e que independente do caso a ser simulado, o arquivo da Figura 5 deverá ser fornecido. Observa-se que, apesar da intensidade da chuva variar ao longo do tempo, o evento isolado sobre esta simplificação. O interior do arquivo de parâmetro segue como o ilustrado na Figura 5 com os valores da BESJC.

```

4.30
  2   0   0
  Station:  DES MOINES WB AP IA                      CLIGEN VERSION 4.3
Latitude Longitude Elevation (m) Obs. Years   Beginning year   Years simulated
  7.25   36.30           500           1           1           1
Observed monthly ave max temperature (C)
  33.0   33.3   33.0   32.1   31.3   29.5   29.3   29.6   31.4   32.8   32.5   33.6
Observed monthly ave min temperature (C)
  21.6   21.5   21.6   21.3   20.6   19.3   18.5   18.1   20.0   20.3   21.5   21.4
Observed monthly ave solar radiation (Langleys/day)
  251.9  217.0  233.4  219.6  232.8  171.4  203.6  249.1  256.7  262.2  275.2  254.1
Observed monthly ave precipitation (mm)
  53.9  45.5  74.8  56.3  41.3  27.6  28.2  22.3  8.1  5.4  7.8  19.5
da mo year  prcp  dur   tp      ip  tmax  tmin  rad  w-vl  w-dir  tdew
           (mm) (h)      (C)  (C)  (l/d) (m/s)(Deg) (C)
  11  3   87  32.0  3.30  0.08  7.42  27.0  22.0  439.4  1.4  312.  25.0

```

Figura 5 - Arquivo do evento de chuva (dia 11/03/1987).

Todos os dados do arquivo de chuva acima são provenientes da estação climatológica da BESJC, exceto os parâmetros *tp* e *ip* que são parâmetros do WEPP para a intensidade do evento e são calculados automaticamente quando inseridos no editor de eventos, programa interno ao WEPP (Santos, 2008).

3.6 - Parâmetros a serem calibrados

Os parâmetros do modelo podem ser agrupados nas seguintes categorias:

- a) Parâmetros que são obtidos através de ensaios na área experimental ou de acordo com as características geométricas dos elementos: *Média mensal de temperatura máxima, Média mensal de temperatura mínima, Média mensal de radiação solar, Média mensal de precipitação, Velocidade do vento, ponto de orvalho.*
- b) Parâmetros que foram obtidos através da literatura, com base em trabalhos efetuados na BESJC ou em áreas semelhantes na mesma região: *profundidade do solo, percentual de argila, areia e rocha.* Esses valores foram arbitrados de forma a se obter a melhor estimativa nos resultados da produção de sedimento devido à capacidade do modelo.
- c) Parâmetros que precisam de calibração: *Saturação inicial do solo (S_i), erosão pelo fluxo superficial (K_i), erosão pelo fluxo em canais ou em sulcos (K_r), Tensão, condutividade hidráulica saturada (K_s).*

4 - APLICAÇÃO DO MODELO

4.1 - Discretização das sub-bacias

Como mencionado, o modelo WEPP necessita de uma representação da bacia em forma de planos e canais e que seja levado em consideração à topografia e toda a rede de drenagem. Em sua versão Windows, o WEPP disponibiliza uma área onde o usuário poderá inserir o mapa da bacia e efetuar a discretização, de forma que, ao término deste processo, será gerado um arquivo com a geometria da bacia discretizada (área e comprimento de cada elemento), faltando somente à inserção dos valores parâmetros que são característicos de solo e uso de solo, próprios da área onde a bacia está localizada.

Uma vez concluída esta fase, o arquivo de parâmetros relativos à bacia, contendo elementos planos e canais, ficará a disposição para a simulação. Com base neste roteiro, a SB1 foi discretizada em 87 elementos (62 planos e 25 canais) e a SB2 foi discretizada em 54 elementos (37 planos e 17 canais), ver Figuras 6 e 7.

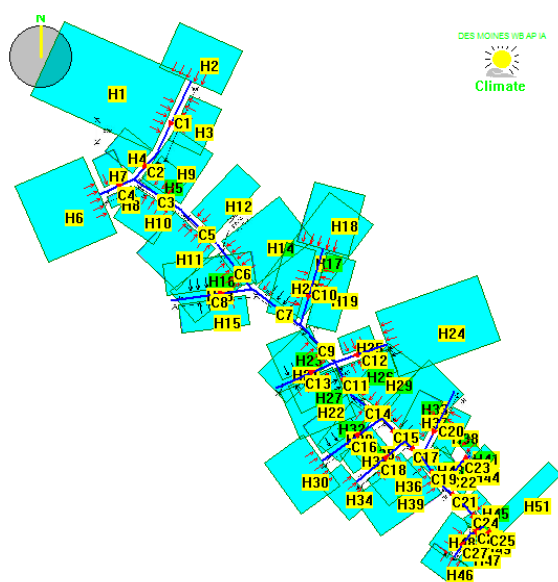


Figura 6 – Discretização da sub-bacia 1 em 87 elementos

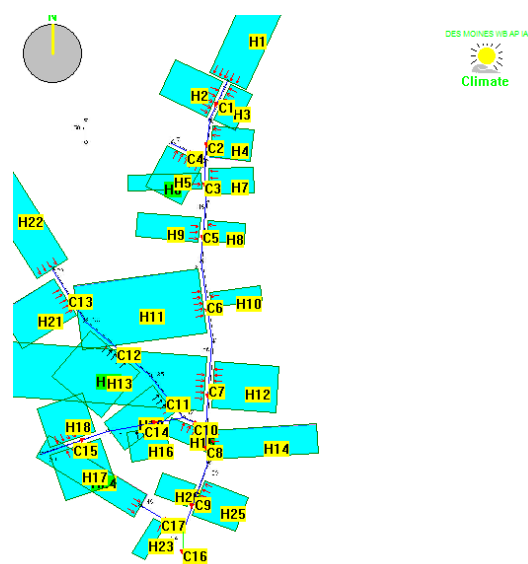


Figura 7 – Discretização da sub-bacia 2 em 54 elementos

4.2 - Calibração e Simulação dos parâmetros do modelo WEPP para as sub-bacias 1 e 2

Efetuada a discretização da bacia, o próximo passo no processo da modelagem é a escolha do modo de simulação, *hillslope (elemento plano)* ou *Watershed (bacia hidrográfica)*, sendo esta segunda opção a utilizada no presente trabalho. De posse do arquivo de chuva (Figura 5) e do arquivo de parâmetros foi dado início a simulação. Para tanto, cada arquivo relativo ao plano

discretizado deve ser editado conforme as características da região a ser analisada. Por exemplo, o plano 1 da SB1 foi discretizado no modelo como mostra a Figura 8.

Observa-se nesta figura que é possível modificar as informações sobre o solo do plano e a distribuição da declividade do mesmo. Daí, ao clicar na linha verde desse plano, o modelo habilita o uso do editor de solos. Neste editor (Figura 9), estão todas as características e os parâmetros principais a serem calibrados pelo modelo, dentre eles, a saturação (S_i), erosão pelo fluxo superficial (K_i), erosão pelo fluxo em canais ou em sulcos (K_r), Tensão, condutividade hidráulica saturada (K_s). Para calibração, foi escolhido o processo de tentativa e erro, procurando fazer com que o resultado do modelo atingisse valor próximo ou igual ao valor observado, quer seja para lâmina (calibração de S_i), quer seja para produção de sedimentos (calibração de K_i – erosão nos planos; calibração de K_r – erosão nos canais).

Deve-se lembrar que da escolha do tipo de solo e das condições climatológicas dependem os valores máximos e mínimos de saturação relativa deste solo (umidade volumétrica/porosidade), como por exemplo, para o solo da BESJC, estes valores foram 95 % e 14,28 %, respectivamente. Outro fator influente nos resultados simulados é o número de camadas componentes do solo que no WEPP poderão atingir até 10 horizontes.

Na primeira tentativa de calibração foi utilizado um solo com apenas uma camada, porém, não foi possível a calibração dos eventos. Logo, decidiu-se utilizar duas camadas de solo (solo com até dois horizontes): a camada da superfície com uma espessura de 60 mm e a segunda com espessura de 500 mm. Com esta configuração foi possível calibrar um maior número de eventos. A composição do solo da BESJC para a qual foi possível a calibração de um maior número de eventos está listada na Tabela 1.

Dentre os parâmetros listados na Figura 9 e na Tabela 1, um dos que influencia diretamente o valor da condutividade hidráulica saturada K_s é a capacidade de troca de cátions (CEC - *Cation Exchange Capacity*). O CEC significa a quantidade de cátion (porção de molécula dissociada que vai para o pólo negativo) absorvida sobre partículas de solo por unidade de massa sob condições químicas neutras (milliequivalents/100 gramas de solo). A definição do valor de CEC para o solo em estudo é efetuada com base em uma tabela disponibilizada pelo modelo, que relaciona a textura do solo e o seu respectivo CEC, sendo o valor encontrado igual 5,0.

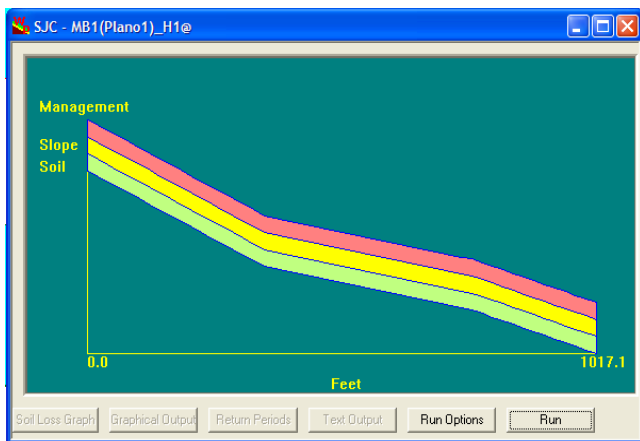


Figura 8 – Representação do plano 1 da SB1 discretizada em 87 elementos no modelo WEPP

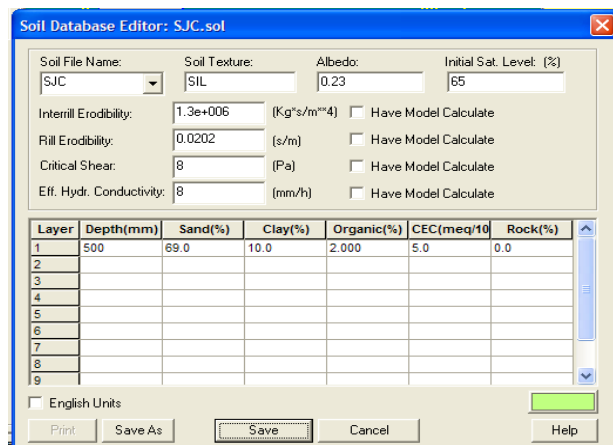


Figura 9 – Editor de solo do modelo WEPP

Tabela 1 – Características do arquivo de solo (2 camadas)

Depth (mm)	Sand (%)	Clay (%)	Organic (%)	CEC (meq/100g)	Rock (%)
60,00	50,00	10,00	6,50	5,00	5,00
500,00	20,00	10,00	2,00	5,00	7,00

5 - RESULTADOS E DISCUSSÕES

• Sub-bacia 1

O valor de saturação inicial S_i foi fixado em 75% e o parâmetro de condutividade hidráulica K_s foi calibrado evento a evento, de modo a fazer com que o escoamento calculado se aproxima do escoamento observado. Desta forma, o valor de K_s igual a 4,0 mm/h permitiu a calibração do parâmetro S_i em um maior número de eventos. Posteriormente, este valor foi considerado para as duas sub-bacias e assim foi possível a calibração da saturação para todos os eventos da sub-bacia 1. A Figura 10 apresenta os resultados da calibração da saturação para a sub-bacia 1. A Figura 11 apresenta a correlação entre os valores de lâmina calculada e observada. Pode-se observar que, na maioria dos eventos a saturação inicial relativa foi calibrada com uma valor acima de 50% e que, com base neste, uma correlação de 0,8633 significa uma aproximação entre valor observado e calculado, uma vez que se trata de um processo de calibração.

Após a calibração de S_i , foi possível calibrar os parâmetros relativos ao modelo de erosão (K_i - erosão nos planos e K_r - erosão nos canais). Entretanto, dos 23 eventos que continham dados observados de erosão, em apenas 12 foi possível a calibração do parâmetro S_i , que controla o cálculo da lâmina, e, conseqüentemente, somente estes foram utilizados para a calibração dos parâmetros relacionados à erosão.

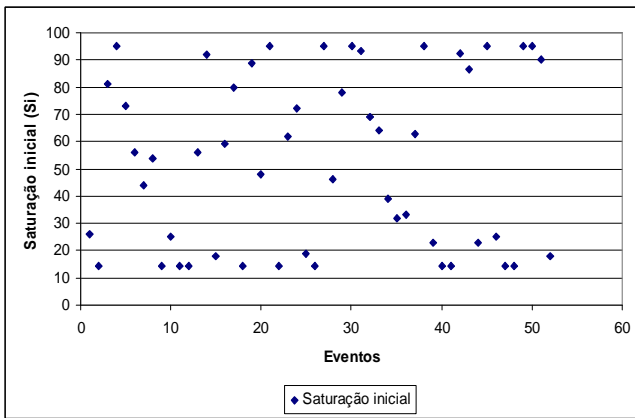


Figura 10 - Saturação inicial relativa do solo para cada cheia na sub-bacia 1 durante a calibração

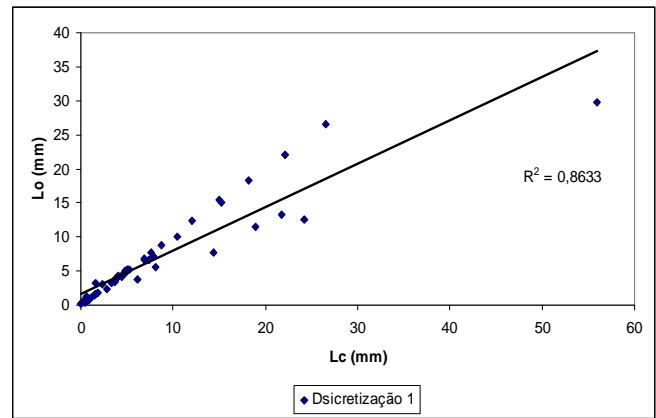


Figura 11 - Valor da correlação entre as lâminas observada e calculada para a sub-bacia 1 na simulação

A priori, considerando que, do ponto de vista hidrossedimentológico e observado as escalas em questão, as micro-bacias existentes na BESJ teriam comportamento semelhante às sub-bacias em questão quando sujeitos a chuva natural, o valor do parâmetro K_i e da tensão de cisalhamento, calibrados para as micro-bacias da BESJC (Paiva, 2008) foram empregados nos planos das sub-bacias, porém, os resultados da produção de sedimento foram altos. Assim sendo, a tensão de cisalhamento foi calibrada para as sub-bacias, evento a evento, de modo a se obter uma menor produção de sedimentos tendo sido encontrado um valor médio de tensão de cisalhamento igual a 20 Pa. Após fixar a tensão, foi possível a calibração do parâmetro K_i . Os valores de erosão calculados pelo modelo continuavam altos, logo, foi utilizado o menor valor aceitável no modelo para esse parâmetro que é $K_i = 1 \times 10^4 \text{ kgs/m}^4$.

Após a fixação dos valores dos parâmetros K_i e a tensão de cisalhamento, os resultados de produção de sedimentos simulados ainda permaneceram altos. Através dos arquivos de saída do modelo, observou-se que, com os valores citados dos parâmetros, os canais de drenagem da sub-bacia estavam produzindo grandes quantidades de sedimentos para cada evento. Logo, o parâmetro K_r que, inicialmente, estava fixado em 0,0202 s/m (default), como nas parcelas e micro-bacias (Paiva, 2008), foi calibrado através de várias tentativas.

Os valores de produção de sedimento, observados nas duas sub-bacias, são baixos, sendo o maior valor igual a 33 kg/ha. Entretanto, foi observado durante as calibrações que a menor quantidade de sedimentos produzido, calculada pelo modelo, é de 100 kg/ha. Considerando que o critério para calibração dos parâmetros K_i e K_r é o de obter um resultado da simulação igual ou próximo do observado, este objetivo não pode ser atingido. Sendo assim, o novo critério para calibração dos parâmetros foi o de obter um resultado o mais próximo de zero ou de 100 kg/ha, e

para isso, o único valor de K_r , onde foi possível obter o maior número de eventos nessa margem de valores, foi o valor mínimo admissível, que é de 0,0001 s/m. Os resultados das simulações após todas estas considerações estão listados na Tabela 2.

Os campos em destaque na Tabela 2 apresentam os valores de erosão observados e calculados. Observa-se que os valores calculados de erosão são quase sempre zero (0) ou um número maior ou igual a 100 kg/ha. Quanto ao escoamento superficial observa-se que o modelo, na maioria dos eventos, consegue obter boas estimativas de lâmina, cuja relação entre os valores calculados e observados se aproxima de uma unidade (1).

Tabela 2 – Resultados obtidos na simulação dos parâmetros do modelo WEPP para o escoamento e erosão do solo para a sub-bacia 1

Cheia	$K_i = 10^4 \text{ (kg s /m}^4\text{)} - K_r = 0,0001 \text{ (s/m)} - K_s = 4,0 \text{ (mm/h)} - \text{Tensão} = 20 \text{ (Pa)} - 2 \text{ camadas de solo}$									
	Data	Chuva (mm)	L_o (mm)	E_o (ton/ha)	E_o (kg/ha)	L_c (mm)	S_i	L_c/L_o	E_c (ton/ha)	E_c (kg/ha)
41	25/01/04	64,8	12,515	0,02182	21,82	24,275	14,280	1,940	0,300	300,000
42	31/01/04	12,1	1,138	0,00061	0,61	1,144	92,500	1,006	0,000	0,000
43	27/02/04	17,0	1,746	0,00352	3,52	1,792	86,500	1,026	0,000	0,000
44	15/07/04	45,7	4,471	0,00061	0,61	4,600	23,000	1,029	0,000	0,000
45	17/02/05	9,6	0,105	0,00116	1,16	0,058	95,000	0,553	0,000	0,000
46	25/03/05	22,6	0,426	0,00303	3,03	0,461	25,000	1,083	0,000	0,000
47	29/03/05	36,0	3,684	0,00521	5,21	6,103	14,280	1,657	0,100	100,000
48	28/04/05	38,4	6,551	0,01697	16,97	6,854	14,280	1,046	0,100	100,000
49	24/04/06	9,3	0,398	0,00559	5,59	0,131	95,000	0,329	0,000	0,000
50	27/04/06	12,1	3,304	0,00400	4,00	1,593	95,000	0,482	0,000	0,000
51	13/05/06	15,8	0,894	0,01222	12,22	0,803	90,100	0,898	0,000	0,000
52	21/06/06	32,8	4,221	0,02643	26,43	4,010	18,000	0,950	0,000	0,000

• Sub-bacia 2

Dada a proximidade das duas sub-bacias, foi assumido que o valor médio do parâmetro K_s (4,0 mm/h), resultante da calibração para a SB1, poderia ser utilizado nas simulações com a SB2. Esta suposição mostrou-se acertada uma vez que foi possível calibrar o valor de S_i para a maioria dos eventos sob análise de forma que a lâmina calculada foi próxima ou igual aos valores observados como pode ser constatado na Tabela 3.

A Figura 12 apresenta a relação S_i x eventos onde se pode constatar que existe uma grande variação do valor deste parâmetro de evento para evento. Este fato já era esperado uma vez que o WEPP quando trabalha no modo eventual não considera a umidade antecedente ao evento, o que leva a valores diferentes de S_i para cada evento. Além disso, esta variação do valor de S_i é um reflexo das suposições utilizadas na concepção do modelo de Green & Ampt (1911), onde o processo de infiltração já parte com uma lâmina de água sobre a superfície, o que leva a valores de S_i próximos da saturação relativa do solo sob análise. A Figura 13 apresenta a correlação entre os valores observados e calculados de lâmina ambos para a sub-bacia 2.

Semelhante ao procedimento efetuado para a SB1, após a calibração do parâmetro de saturação S_i (SB2), foi possível calibrar os parâmetros de erosão com os dados desta sub-bacia. Dos 22 eventos que continham dados de observados de erosão, em apenas 11 foi possível a calibração do parâmetro S_i . Como o modelo de erosão depende do modelo hidrológico, os eventos utilizados para a calibração de K_r foram aqueles onde foi possível a calibração de S_i . Para estas simulações o valor do parâmetro K_i foi fixado em $1 \times 10^4 \text{ kgs/m}^4$, obtendo-se bons resultados. O mesmo aconteceu com a tensão de cisalhamento, cujo valor de 20 Pa, gerou bons resultados.

Como já era esperado, os resultados de produção de sedimentos simulados foram altos e o parâmetro K_r também foi calibrado evento a evento e, de forma semelhante, o valor mínimo empregado nas simulações para a SB1 também foi utilizado para a SB2 (0,0001 s/m), uma vez que, os valores de sedimento observados na sub-bacia 2, assim como na sub-bacia 1, são baixos e o mesmo critério para calibração da erosão foi utilizado. Os resultados da lamina escoada e da produção de sedimentos para os eventos que continham dados de erosão observados estão na Tabela 3. Os campos em destaque na Tabela 3 apresentam os valores de erosão observados e calculados. Da mesma forma que na sub-bacia 1, os valores calculados de lâmina são próximos aos valores observados. No entanto, os valores de erosão são quase sempre iguais à zero.

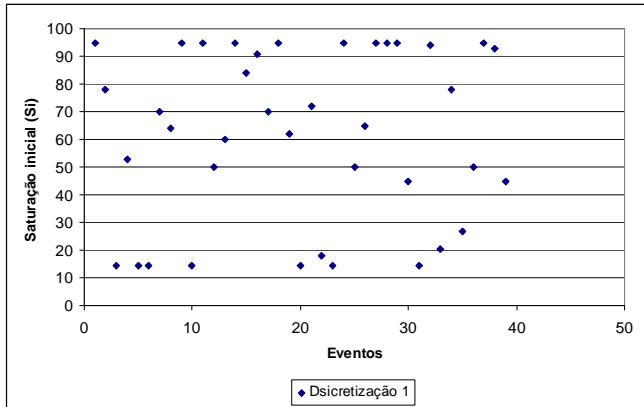


Figura 12 – Saturação inicial relativa do solo para cada cheia na sub-bacia 2 durante a calibração.

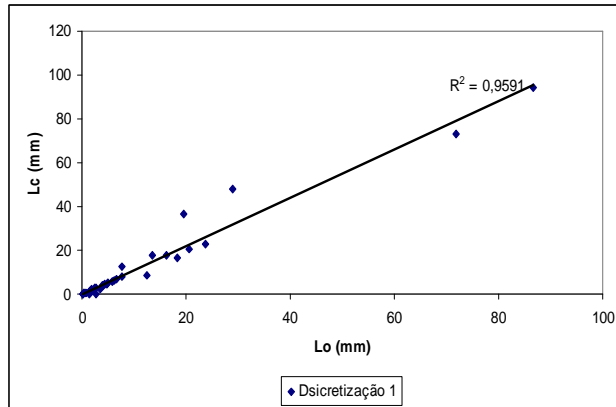


Figura 13 - Correlação entre as lâminas observadas e calculadas para a sub-bacia 2 durante a calibração (discretização 1).

Tabela 3 – Resultados obtidos na simulação dos parâmetros do modelo WEPP para o escoamento e erosão do solo

Cheia	$K_i = 10^4 \text{ (kg s /m}^4\text{)} - K_r = 0,0001 \text{ (s/m)} - K_s = 4,0 \text{ (mm/h)} - \text{Tensão} = 20 \text{ (Pa)} - 2 \text{ camadas de solo}$									
	Data	Chuva	L_o (mm)	E_o (t/ha)	E_o (kg/ha)	L_c (mm)	S_i	L_c/L_o	E_c (ton/ha)	E_c (kg/ha)
29	28/1/2004	14,8	1,421	0,00521	5,21	0,072	95,000	0,051	0,000	0,000
30	5/2/2004	29,2	1,729	0,00344	3,44	1,763	45,000	1,020	0,000	0,000
31	12/2/2004	14,1	0,504	0,00581	5,81	0,569	14,280	1,129	0,000	0,000
32	27/2/2004	17,0	3,475	0,00536	5,36	2,091	94,000	0,602	0,000	0,000
33	15/7/2004	43,9	4,049	0,00083	0,83	3,969	20,500	0,980	0,000	0,000
34	25/4/2005	19,6	5,896	0,01355	13,55	5,663	78,000	0,961	0,000	0,000
35	26/4/2005	28,2	1,975	0,01663	16,63	1,978	27,000	1,002	0,000	0,000
36	28/4/2005	38,4	7,811	0,01762	17,62	7,841	50,000	1,004	0,100	100,000
37	6/12/2005	11,9	2,803	0,00661	6,61	0,197	95,000	0,070	0,000	0,000
38	13/5/2006	8,1	0,343	0,01211	12,11	0,384	93,000	1,119	0,000	0,000
39	21/6/2006	32,8	4,359	0,03395	33,95	4,300	45,000	0,986	0,000	0,000

6 – CONCLUSÕES

Utilizando-se dados de duas sub-bacias da BESJC procurou-se verificar a aplicabilidade do modelo WEPP. Os aspectos investigados neste trabalho compreendem essencialmente a parametrização do modelo para uma bacia na escala de algumas dezenas de hectares e, com base nos resultados obtidos, conclui-se o que se segue.

- Apesar de possuir um grande banco de dados internos, o modelo WEPP não permite alterar livremente os parâmetros, pois os mesmos estão associados ou vinculados com as características do solo, da região e da própria estação climatológica;
- Dos 98 eventos registrados na SB1, apenas em 52 foi possível a calibração do parâmetro S_i . Por outro lado, para 91 eventos observados na SB2, somente em 50 foi possível calibrar o parâmetro S_i de forma que a lâmina calculada fosse igual ou próximo a observada. Esses resultados demonstram que apesar do modelo ser capaz de simular o escoamento superficial para esta região outros fatores que não somente a saturação inicial deverão ser considerados;
- O modelo WEPP possui pouca precisão para valores de produção de sedimentos em bacias na escala das que foram testadas (0,3 a 0,6 km²), sendo a menor produção considerada de 100 kg/ha;
- No modelo e para a escala em estudo, a erosão por impacto de gotas de chuva, deixa de ser o processo erosivo predominante para dar lugar à erosão por fluxo concentrado em pequenos sulcos e nos canais;

- Faz-se necessário empreender outros estudos em áreas maiores para verificar a adequação do modelo WEPP para uma previsão da erosão na região semi-árida Paraibana e conseqüentemente uma melhor definição dos parâmetros referentes à erosão do solo.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq/CAPES pelo auxílio proporcionado ao estudo através dos programas de fomento e bolsas.

BIBLIOGRAFIA

ARAGÃO, R. (2000). *Estimativa dos Parâmetros do Modelo Distribuído WESP com 9os Dados da Bacia Experimental de Sumé – PB*. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Campina Grande – UFCG. Área de Recursos Hídricos.

ARAGÃO, R.; SRINIVASAN, V.S.; SUZUKI, K.; WATANABE, M. (2002). *Estimation of Parameters of a Hydrodynamic Runoff-Erosion Model with Data from a Semiarid Region in Brazil*. In: *Advances in Hydraulics and Water Engineering*. Cingapura: World Scientific Publishing Co. Pte., v. 1, p. 530-538, 2002.

ARAGÃO, R.; SRINIVASAN, V.S.; LOPES, W.T.A.; SILVA, A.F. (2002). *Avaliação do Modelo CHDM Utilizando Dados de uma Bacia Experimental no Semi-Árido Nordeste*. In: *Anais do VI Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste*, Maceió: ABRH, v. 1. (Anais em CDROM).

ARAGÃO, R. (2006). *Análise da Influência Antrópica na Produção de Escoamento Superficial e Sedimentos em Bacias Hidrográficas do Cariri Paraibano Através da Modelização dos Processos Físicos e do Emprego de Sig*. Relatório Técnico, Edital 002/03 – FAPESQ-PB/MCT/CNPq, CNPq – Processo Nº. 35.0599/2004-1

BENNETT, J. P. (1974). *Concepts of mathematical modeling of sediment yield*. *Water Resources Research*, 10(3): 485-492.

CHU, S. T. (1978). *Infiltration during an unsteady rain*. *Water Resources Research*, 14(3):461-466.

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. (1982). *Modelling the erosion process*. In: Haan, C. T.; Johnson, H. P. e Brakensiek, D. L., Ed. *Hydrologic modeling of small watersheds*, St. Joseph, American Society Agricultural Engineers, p. 297-380.

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. Apud Mein & Larson (1 973).

MEIN, R. G. e LARSON, C. L. (1973). *Modeling Infiltration During a Steady Rain*. *Water Resources Research*. 9(2): 384-394.

PAIVA, F. M. de L. (2008). Estudo Comparativo entre Três Modelos de Base Física na Modelagem Hidrossedimentológica em Micro-bacias na Região Semi-Árida Paraibana. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Campina Grande – UFCG. Área de Recursos Hídricos.

SANTOS, L. L. (2008). Modelagem Hidrossedimentológica e Avaliação Comparativa de Três modelos em Pequenas Sub-bacias na Região Semi-Árida Paraibana. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Campina Grande – UFCG. Área de Recursos Hídricos.

SRINIVASAN, V.S; GALVÃO, C.O. (1995). *Evaluation of Runoff and Erosion Loss in Microbasin Utilizing the Hydrodynamic Model WESP*. In: Advances in Engineering Software. v. 22 p. 79-85. Publ. no. 21.

SRINIVASAN, V.S., GALVÃO, C.O., SANTOS, C.A.G., FIGUEIREDO, E.E., REGO, J.C., ALCÂNTARA, H.M., ALBUQUERQUE, J.P.T., ARAGÃO, R., MELO, R.N.T., CRUZ, E., GUEDES, G.A., LACERDA, I., SANTOS, L.L., ALVES, F.M. (2004). *Bacia Experimental de São João do Cariri-PB*. In: Righetto, A.M. (Org.), Implantação de Bacias Experimentais no Semi-árido, Cap. 4, FINEP/FUNPEC/CNPq/CTBRASIL. 93-126.

TISCARENO-LOPEZ, M., A BAYESIAN-MONTE CARLO (1994). *Approach to Assess Uncertainties in Process-Based, Continuous Simulation Models*. Ph.D.Dissertation, University of Arizona, Tucson, AZ.

WILLIAMS, J.R., C.A. JONES e P.T. DYKE. (1984). A modeling approach to determining the relationship between erosion and soil productivity. Trans. ASAE 27(1):129-144.