



PRPG | Pré-Reitoria de Pós-Graduação
PIBIC/CNPq/UFCA-2009

MODELAGEM DOS PROCESSOS DE ESCOAMENTO SUPERFICIAL E EROÇÃO DO SOLO EM DUAS SUB-BACIAS DO RIACHO DOS NAMORADOS NA BACIA EXPERIMENTAL DE SÃO JOÃO DO CARIRI, PB.

Itamara Mary Leite de Menezes Taveira¹ e Vajapeyam Srirangachar Srinivasan²

RESUMO

As atividades humanas têm modificado os processos hidrossedimentológicos em todo o planeta, principalmente em regiões semi-áridas. Essas regiões tem sido alvo de constantes desmatamentos, o que favorece o processo de erosão e escoamento superficial, causando também o empobrecimento do solo levando-o a infertilidade. A utilização de modelos hidrossedimentológicos torna-se imprescindível para avaliar as conseqüências destes processos com as mudanças no uso da terra. O presente trabalho apresenta os resultados obtidos com a modelagem dos processos de escoamento superficial e de erosão em duas sub-bacias do Riacho dos Namorados da Bacia Experimental de São João do Cariri – PB, utilizando o modelo hidrossedimentológico WEPP (Water Erosion Prediction Project). Os processos de modelagem utilizados neste estudo envolvem diversas etapas, tais como: (1) Preparação dos arquivos de dados; (2) calibração de parâmetros do modelo, (3) Validação dos parâmetros e (4) simulação. Com o modelo WEPP também foi analisado a sensibilidade dos parâmetros relacionados à lâmina escoada. Os resultados mostraram que o modelo é satisfatório para simular os processos hidrossedimentológicos na região do cariri paraibano.

Palavras-chave: modelagem; WEPP.

MODELING THE PROCESSES OF RUNOFF AND SOIL EROSION INTO TWO SUB-BASIN OF RIACHO DOS NAMORADOS OF EXPERIMENTAL BASIN OF SÃO JOÃO DO CARIRI, PB.

ABSTRACT

The activities of man modify the natural processes of runoff and erosion and in particular, within the semiarid regions where an acceleration in the runoff and erosion processes would be detrimental. Excessive erosion will lead to the loss of soil fertility and diminishing productivity of crops. Estimates of runoff and erosion obtained from a modeling process would be very important in the planning process and in the evaluation of land use changes. The present work is an attempt in modeling runoff and erosion processes into two sub-basins of Riacho dos Namorados of the Experimental Basin of São João de Cariri, using the model WEPP (Water Erosion Prediction Project). The processes of modeling used in this study involves several steps, such as: (1) Preparation of the entry files of data; (2) Calibration of the parameters of the model, (3) Validation of the parameters and (4) simulation. The sensibility of some of the model parameters was also investigated. The results show that the model is quite satisfactorily for the semiarid region of Paraíba.

Keywords: modeling, WEPP

¹ Aluna do Curso de Engenharia Civil, Unidade Acadêmica de Engenharia Civil, UFCA, Campina Grande, PB, E-mail: itamaramary@gmail.com

² Professor do curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental – AERH/UAEC/CTRN/ Campina Grande, PB, E-mail: vajapeyam2000@yahoo.com.

INTRODUÇÃO

O intenso uso do solo e recursos naturais em geral, tem mostrado a importância de estudos e pesquisas nas áreas referentes ao transporte e deposição de sedimentos nas bacias hidrográficas, conseqüentemente a produção de sedimentos é objeto de preocupação em todas as situações referentes à gestão do uso do solo e da água.

A necessidade de estudos hidrológicos de longo prazo em ambientes específicos, como o semi-árido, é um consenso na comunidade científica e na de engenharia hidrológica (SRINIVASAN et al, 2003). 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, serve como local de fonte de dados de vazão e de erosão. Desde então, 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, além de apresentar má distribuição espacial apresenta também uma péssima distribuição temporal influenciando diretamente no escoamento superficial e na produção de sedimentos (Santos, 2005).

Os resultados obtidos nas bacias experimentais são extremamente úteis para o conhecimento do comportamento hidrossedimentológico, e os mesmos servem de base para a realização de estudos similares em bacias, onde os valores obtidos das coletas diárias dos experimentos medidos em campo podem ser transferidos para outras bacias localizadas numa mesma região hidrologicamente homogênea. Portanto, a realização de estudos em bacias experimentais é de suma importância para o conhecimento hidrológico de uma bacia hidrográfica. Os estudos de escoamento superficial e erosão do solo em uma bacia experimental são feitos com a utilização de modelos hidrossedimentológicos devidamente calibrados e legitimados a partir de dados observados.

Modelos hidrossedimentológicos distribuídos de base física têm sido cada vez mais utilizados em estudos de análise e do acompanhamento de sistemas de aproveitamento e controle dos recursos naturais. De um modo geral, os modelos distribuídos requerem em primeiro lugar uma representação da bacia, na forma de quadrículas, planos e canais ou em sub-bacias; e em segundo uma avaliação dos parâmetros, que pode ser feita através de estimativas, quando esses forem mensuráveis ou calibrados, comparando-se valores simulados com observados, quando forem fatores de ajustamento dos processos. Independentemente do caso, uma etapa crucial para utilizar os parâmetros, estimados ou calibrados, na fase de simulação é saber como estes variam com a escala da bacia para diminuir as incertezas nas simulações (Furtunato et al., 2005).

O presente trabalho tem por finalidade a modelagem hidrossedimentológica das unidades experimentais da Bacia Experimental de São João do Cariri utilizando o modelo WEPP.

MATERIAL E MÉTODOS

A Bacia Experimental de São João do Cariri (BESJC) tem uma área de aproximadamente 15 Km² e drena suas águas para o açude público dos Namorados construído pelo DNOCS. A bacia localiza-se na parte média da Bacia do Rio Taperoá, com 7° 25' de latitude Sul e 36° 30' de longitude Oeste, nas proximidades da cidade de São João do Cariri - PB (Santos et al., 2004).

Neste trabalho foram utilizados dados provenientes de duas sub-bacias na Bacia Experimental de São João do Cariri.

Sub-bacia 1

Os trabalhos na sub-bacia 1 (SB1) foram iniciados em 1987, com a instalação de linígrafos, régua de máxima e régua linimétrica. Para o registro das cheias de tributários do riacho principal, o riacho dos Namorados, foi instalado um vertedor triangular de soleira espessa (Figura 1) em uma seção do riacho, cuja área de contribuição é 0,59 km² (área da SB1).

Sub-bacia 2

Concomitante com a instalação do vertedor da SB1, em 1987 se iniciaram os trabalhos na sub-bacia 2 (SB2), sendo construído para tanto, um vertedor composto de soleira delgada cuja área de contribuição é 0,32 km² (Figura 2).

A SB2 possui uma vegetação nativa relativamente conservada, e em relação a SB1, para uma dada precipitação, observa-se o efeito protetor da vegetação para o solo que diminui, de maneira significativa, a produção de sedimentos.



Figura 1 - Vertedor da SB1.



Figura 2- Vertedor da SB2.

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.

Modelo de Infiltração

O modelo WEPP utiliza o modelo de infiltração de Green-Ampt (1911), com a modificação proposta por Mein et al (1973), para modelar a infiltração durante uma chuva permanente, com a introdução do parâmetro de correção para a diferença entre o tempo instantâneo e o tempo atual de empoçamento além do déficit de umidade na mistura de solo, conforme a Equação 1, que se segue:

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

em que, f_c a taxa de infiltração (m/s), K_e a condutividade hidráulica saturada (mm/h), t_c é a correção da diferença do tempo real de empoçamento, θ_d efetiva é o déficit de umidade na mistura de solo ($m \cdot m^{-1}$) e Ψ é o potencial capilar médio (m).

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

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

Onde o subscrito i e $i-1$ referem-se a intervalos correntes e prévios de tempo, respectivamente, F no modelo WEPP, é a profundidade cumulativa de infiltração (m), e t é o tempo (s), a partir do início.

A infiltração cumulativa é calculada usando o modelo de Mein et al (1973), e o apresentado por Chu (1978) para o caso de intensidade de chuva incidente em um determinado ponto de alagamento.

De acordo com Williams et al., (1984), o Serviço de Pesquisa Agrícola do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos realizou extensos trabalhos para desenvolver relações empíricas para a obtenção de parâmetros para a equação de Green-Ampt. Uma das vantagens da equação de Green-Ampt é a sua aplicabilidade em diferentes condições iniciais do solo (Chu, 1978).

A equação de Green-Ampt foi desenvolvida considerando 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 condições de precipitação, pois deveria haver antes a saturação da camada próxima à superfície e o empoçamento de água sobre a superfície do solo.

Chu (1978) calculou um indicador, C_u (m), pelo qual determina se esse ponto de empoçamento ocorre dentro de um intervalo dado da intensidade uniforme de chuva, não tendo ocorrido em nenhum ponto do elemento, no começo do intervalo, o empoçamento. Se C_u é positivo, o empoçamento ocorre dentro do intervalo. Neste caso, o tempo para o empoçamento dentro do intervalo é 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:

$$C_u = R_i - V_i - \left[\frac{K_e \Psi \theta_d}{r_{i-1} - K_e} \right] \quad \text{Eq. (3)}$$

em que 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). O déficit de umidade na mistura de solo é calculado como:

$$\theta_d = \eta_e - \theta_v \quad \text{Eq. (4)}$$

Onde η_e é a porosidade efetiva (m/m) e θ_v é o conteúdo volumétrico inicial da água por unidade de área (m^3/m^3). A altura de excesso de chuva acumulada é calculada por:

$$V_i = R_i - F_i \quad \text{Eq. (5)}$$

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:

$$C_p = R_i - F_i - V_i \quad \text{Eq. (7)}$$

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:

$$F_i = R_i - V_{i-1} \quad \text{Eq. (8)}$$

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:

$$q = \alpha h^m \quad \text{Eq. (9)}$$

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 que é igual a $C(S_0)^{0.5}$ onde C é o coeficiente de Chezy ($\text{m}^{0.5}/\text{s}$) e S_0 é a declividade e m é igual a 1,5.

A Equação 9 é utilizada juntamente com a equação da continuidade:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = v \quad \text{Eq. (10)}$$

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. (9) é substituída na Eq. (10), onde se obtém:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \alpha m h^{m-1} \frac{\partial h}{\partial x} = v \quad \text{Eq. (11)}$$

Fluxo nos Canais

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

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = Q \quad \text{Eq. (12)}$$

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:

$$Q = \alpha R^{m-1} A \quad \text{Eq. (13)}$$

em que 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.

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 dentro do intervalo de tempo utilizado, ou seja:

$$\frac{dG}{dx} = D_i + D_r \quad \text{Eq. (14)}$$

em que G é a carga de sedimentos, $M T^{-1} L^{-2} x$ 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 15, proposta por Flanagan et al (1995).

$$D_i = C_i K_i S_f I_p^2 G_e \quad \text{Eq. (15)}$$

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 contra a 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:

$$D_r = C_r K_r (\tau - \tau_c) \left(1 - \frac{G}{T_c} \right) \quad \text{Eq. (16)}$$

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:

$$V_f = \frac{D_r Q}{\beta(T_c - G)} \quad \text{Eq. (17)}$$

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

$$T_c = K_t \tau_f^{3/2} \quad \text{Eq. (18)}$$

Onde τ_f 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). Essa equação foi modificada, com o objetivo de melhorar a representação das diferenças na capacidade de transporte com as características de tamanho de partícula do solo. Estas modificações são baseadas em prova extensa do modelo WEPP para um alcance grande de tipos diferentes 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, leva-se em conta a diferença nas características de sedimentos, que em geral são a densidade e o diâmetro dos agregados. 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.

Metodologia utilizada

Preparação dos arquivos

Para a modelagem de processos hidrossedimentológicos em sub-bacias é necessário uma discretização das mesmas em elementos como planos e canais. Logo, para a aplicação do modelo foram utilizadas as mesmas discretizações utilizadas por SANTOS (2008), ou seja, a sub-bacia 01 foi discretizada em 87 elementos, sendo 62 planos e 25 canais e a sub-bacia 02 foi discretizada em 54 elementos, tendo 37 planos e 17 canais. A figura 3 apresenta as discretizações da sub-bacia 01.

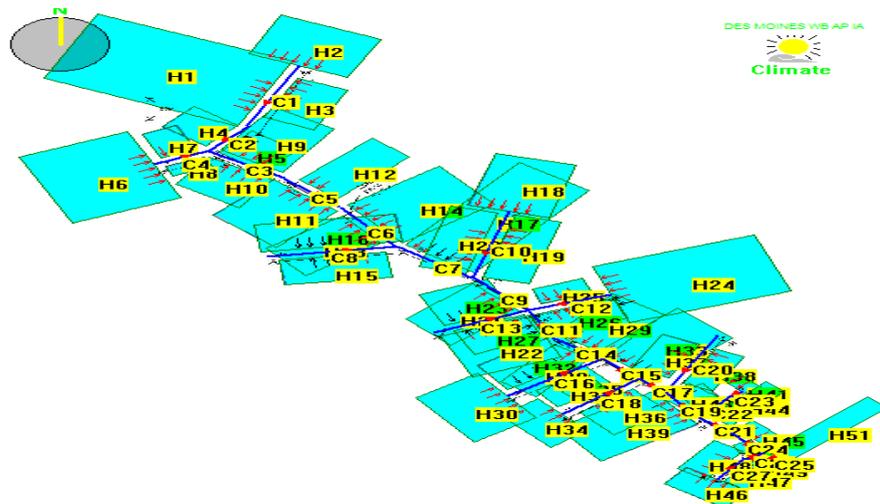


Figura 4 – Discretização da sub-bacia1 para o modelo WEPP.

Em seguida, os arquivos de eventos necessários para a aplicação do modelo foram montados, utilizando os seguintes dados para cada arquivo: data do evento, total da precipitação, duração do evento, intensidade máxima e a porcentagem de tempo da intensidade máxima. Para a montagem dos arquivos de chuva é necessário escolher uma estação climática da lista disponível no programa, neste caso foi escolhida a estação climatologia de DES MOINES WB AP IA no estado de Iowa dos EUA. Quando a estação é escolhida, o modelo salva uma cópia das informações climatológicas dessa estação em uma pasta chamada cligen. Como as informações contidas nesse arquivo são referentes à estação citada, é necessário substituir essas informações pelas características da estação climatológica de São João do Cariri.

O arquivo de solo usado na modelagem foi o mesmo utilizado por SANTOS (2008), ou seja, o arquivo possui duas camadas de solo com as características apresentadas na Tabela 01.

Tabela 01 – Características do arquivo de solo

Layer	Depth(mm)	Sand(%)	Caly(%)	Organic(%)	CEC(meq/100g)	Rock(%)
1	60,00	50,00	10,00	6,50	5,00	5,00
2	500,00	20,00	10,00	2,00	5,00	7,00

Calibração dos parâmetros do modelo WEPP

No processo de modelagem das sub-bacias o parâmetro relativo à saturação inicial do solo varia de evento para evento e o mesmo foi determinado por calibração, ajustando-o até que a lâmina escoada calculada se igualasse a lâmina escoada observada.

Segundo Santos (2008), a precisão do modelo WEPP na versão “Watershed” é muito baixa. A menor produção de sedimentos que o modelo calcula é de 0,1t/ha ou 100 kg/ha. A produção de sedimentos observada nas sub-bacias para todos os eventos são inferiores a 100 kg/ha.

Portanto concomitantemente ao processo de calibração dos parâmetros de infiltração, para obter o melhor ajuste entre a lâmina escoada observada e a calculada, realizou-se a calibração dos parâmetros de erosão para os poucos eventos que tinham estes dados. Desta forma os parâmetros relacionados à erosão tiveram valores fixados nos valores médios. O parâmetro relacionada à produção de sedimentos para os planos (K_i) foi fixado em 10000kgs/m⁴, o parâmetro de erosão nos canais (K_e) foi fixado em 0,0001s/m, a condutividade hidráulica do solo (K_s) em 4mm/h e a tensão de resistência ao cisalhamento foi fixada em 20MPa.

O Processo de calibração e simulação foi realizado com 55 eventos na sub-bacia 01 e 78 eventos na sub-bacia 02.

Validação do modelo

Assim a validação foi realizada utilizando o valor médio da saturação inicial calibrada evento a evento em cada sub-bacia, e simulando o escoamento superficial nos eventos de suas respectivas unidades experimentais.

Como os eventos com dados de erosão foram poucos e a precisão do modelo não permitia a calibração precisa de parâmetros de erosão, o objetivo da validação foi obter um valor médio da saturação inicial do solo que possa ser utilizado em todos os eventos para gerar resultados satisfatórios de escoamento e erosão.

Simulação

Todos os eventos utilizados para validação nas duas sub-bacias foram utilizados no processo de simulação da lâmina escoada, esta compreendeu duas fazes. Primeiramente foram fixados valores para a saturação inicial do solo a partir da saturação inicial média calibrada.

O critério de avaliação utilizado foi o coeficiente de determinação R^2 entre as lâminas de escoamento observadas e calculadas. Em seguida adotaram-se outros valores para a saturação inicial do solo a fim de verificar como os valores de R^2 se comportariam e escolher aquele valor que forneça o melhor resultado em cada sub-bacia.

Assim para a sub-bacia 01 os valores adotados para a saturação inicial do solo foram 40%, 45%, 50%, 60%, 65%, 70%, 75% e 80%, e para a sub-bacia 02 foram utilizados 45%, 50%, 55%, 65%, 70% e 75%, os parâmetros K_i , K_e , K_s e a tensão de resistência ao cisalhamento foram os mesmos utilizados na calibração.

Na segunda etapa do processo de simulação da lâmina escoada, os valores adotados para a saturação inicial do solo que apresentaram melhor resultados na primeira etapa de simulação foram fixados e o parâmetro da condutividade hidráulica do solo (K_s) foi variado com valores de 3 mm/h e 3,5mm/h para a sub-bacia 01 e 5mm/h e 7mm/h para a sub-bacia 02, com o intuito de verificar a influência deste parâmetro no processo. A Lâmina escoada foi simulada para todas as combinações de S_i e K_s , para determinar a melhor combinação destes para cada sub-bacia. Desta forma, uma análise de sensibilidade dos parâmetros principais da infiltração, a saturação inicial e a condutividade hidráulica saturada, foi realizada.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Conforme os procedimentos descritos na seção anterior, a saturação inicial do solo foi calibrada evento a evento e a erosão foi simulada também evento a evento. Os valores médios da saturação obtidos no processo de calibração se encontram na Tabela 2.

Tabela 2 – Valores médios da saturação inicial do solo

Sub-bacia 01	Sub-bacia 02
S _i (%)	S _i (%)
54,94	59,89

A validação foi realizada utilizando os valores médios de parâmetros calibrados evento a evento, e simulando o escoamento superficial para todos os eventos. Comparando os valores de lâmina observada com a calculada, a validação seria considerada como satisfatória ou não. As Figuras 5 e 6 mostram a comparação da lâmina escoada calculada com a observada para as sub-bacias da Bacia Experimental de São João do Cariri, no processo de validação.

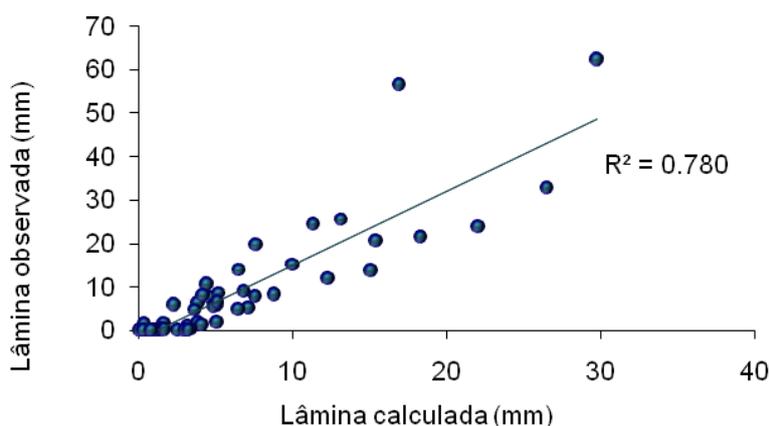


Figura 5 - Correlação entre as lâminas observadas e calculadas para a sub-bacia 01 no processo de validação.

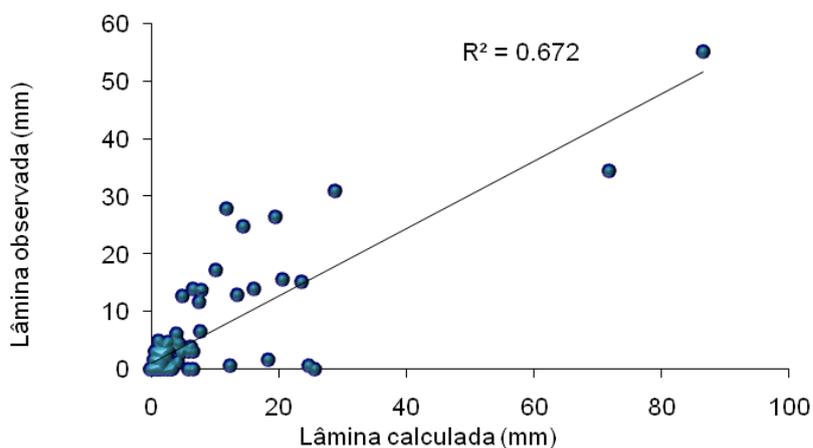


Figura 6 - Correlação entre as lâminas observadas e calculadas para a sub-bacia 02 no processo de validação.

Utilizou-se, como já descrito, outros valores para a saturação inicial do solo, na primeira fase de simulação da lâmina escoada. As Tabelas 3 e 4 apresentam os resultados obtidos na simulação para as sub-bacias 01 e 02 respectivamente.

Tabela 3 – Simulação da lâmina escoada com o modelo WEPP para a sub-bacia 01 utilizando vários valores para a saturação inicial

Data	Chuva (mm)	Lo (mm)	Lâmina Calculada (mm)							
			Si=40%	Si= 45%	Si= 50%	Si=60%	Si= 65%	Si= 70%	Si =75%	Si =80%
11/03/87	32.0	4.742	6.054	6.486	6.953	8.073	8.863	9.668	10.764	11.846
15/03/87	16.0	0.764	0.000	0.000	0.019	0.080	0.147	0.251	0.515	0.783
23/03/87	13.0	0.791	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.058	0.134
28/03/87	26.0	5.142	0.702	0.985	1.300	2.571	3.381	4.300	5.717	6.773
14/02/88	40.5	12.333	10.220	10.732	11.376	14.114	14.771	15.720	16.600	17.549
16/02/88	78.0	16.990	54.168	54.907	55.686	57.834	58.761	59.771	59.725	60.831
23/02/88	28.0	3.924	3.485	3.931	5.669	7.175	8.046	8.890	8.814	10.361
25/02/88	33.0	7.648	5.005	5.314	7.436	8.393	8.727	9.653	9.551	10.176
09/03/88	40.0	6.564	11.669	12.459	13.178	14.734	15.558	16.515	16.456	17.456
14/03/88	33.5	5.249	6.868	7.347	7.781	9.192	9.993	10.807	10.754	11.676
19/04/88	30.0	2.356	4.614	4.959	5.346	6.224	6.693	7.258	7.210	7.797
20/04/88	24.0	1.682	0.478	0.732	1.032	2.693	4.944	5.914	5.866	6.871
21/04/88	12.5	0.553	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
22/04/88	51.0	15.450	18.232	18.876	19.595	21.920	22.953	24.064	23.992	25.193
28/03/89	47.5	8.858	6.836	7.205	7.656	8.893	9.675	10.820	12.042	13.747
10/04/89	18.4	3.242	0.414	0.541	0.692	1.259	1.522	1.951	2.569	3.269
13/06/89	16.3	1.468	0.000	0.014	0.017	0.110	0.169	0.251	0.393	0.637
26/02/90	24.6	5.142	4.347	4.846	5.286	6.263	6.834	7.395	7.978	8.700
14/03/91	15.3	3.036	0.000	0.000	0.000	0.027	0.093	0.154	0.236	0.519
15/03/91	41.2	10.070	13.205	13.792	14.414	15.892	16.666	17.514	18.517	19.571
16/03/91	43.7	15.137	10.651	11.459	12.363	14.856	15.941	17.188	18.647	20.002
29/03/91	21.7	1.542	0.137	0.205	0.297	0.297	1.058	1.395	1.914	2.637
27/01/92	53.4	18.384	20.046	20.551	21.003	21.964	22.478	23.019	23.553	24.176
29/01/92	12.0	0.842	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.012	0.042
10/02/92	29.0	4.947	4.414	4.783	5.112	5.868	6.307	6.800	7.324	7.992
19/05/94	17.7	3.894	1.041	1.249	1.442	2.010	2.419	2.915	3.405	4.280
15/03/95	39.2	3.442	0.000	0.000	0.036	0.573	1.368	4.556	6.458	9.305
02/07/95	22.9	0.289	0.000	0.000	0.000	0.127	0.410	1.190	2.166	3.097
17/01/96	29.9	5.177	5.214	5.642	6.127	7.176	7.714	8.314	8.961	10.285
11/03/96	65.2	22.110	22.763	23.098	23.434	24.097	25.290	26.214	27.449	29.014
12/03/96	75.0	26.570	28.404	29.676	31.392	34.286	35.878	37.592	39.339	41.410
18/04/96	28.1	7.202	3.083	3.303	3.617	5.992	8.064	8.842	9.581	10.566
31/01/04	12.1	1.138	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.008	0.044	0.139
27/02/04	17.0	1.746	0.024	0.076	0.102	0.219	0.349	0.522	0.764	1.141
15/07/04	45.7	4.471	7.480	8.386	9.608	11.769	13.149	14.293	17.193	18.834
17/02/05	9.6	0.105	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
25/03/05	22.6	0.426	0.844	1.054	1.222	2.068	2.505	3.024	3.553	4.414
29/03/05	36.0	3.684	3.383	3.764	4.280	5.236	5.853	6.531	13.215	14.032
28/04/05	38.4	6.551	6.514	10.119	10.749	12.224	13.076	13.815	14.712	15.646
13/05/06	15.8	0.894	0.000	0.000	0.003	0.010	0.015	0.032	0.108	0.197
21/06/06	32.8	4.221	6.341	6.824	7.344	8.758	9.508	10.373	11.376	12.610

Sendo; Lo: Lâmina observada e Si: saturação inicial do solo.

Tabela 4 - Simulação da lâmina escoada com o modelo WEPP para a sub-bacia 02 utilizando vários valores para a saturação inicial

Data	Chuva (mm)	Lo (mm)	Lâmina calculada (mm)					
			Si = 45%	Si = 50%	Si = 55%	Si = 65%	Si = 70%	Si = 75%
13/03/1987	52.0	8.009	12.481	12.878	13.293	14.195	14.693	15.244
15/03/1987	16.0	1.431	0.000	0.020	0.042	0.088	0.137	0.175
23/03/1987	13.0	0.510	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.029
28/03/1987	26.0	4.160	0.466	0.664	0.934	1.680	2.371	3.127
16/02/1988	62.2	28.913	29.439	29.951	30.417	31.446	32.503	33.117
23/02/1988	28.0	6.309	2.037	2.968	3.385	4.486	4.949	5.746
14/03/1988	20.5	1.300	3.873	4.159	4.476	5.234	5.766	6.305
13/04/1988	55.0	16.170	13.114	13.388	13.675	14.292	14.625	14.891
15/04/1988	142.0	86.590	54.112	54.390	54.690	55.356	56.831	58.075
19/04/1988	30.0	4.902	2.620	2.831	3.049	3.549	3.836	4.183
20/04/1988	24.0	1.976	0.381	0.469	0.871	2.712	3.161	3.753
21/04/1988	12.5	0.895	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
22/04/1988	51.0	7.681	10.071	10.480	10.978	12.319	12.941	13.612
28/03/1989	47.5	2.720	3.883	4.149	4.431	5.175	5.698	6.476
08/04/1989	74.4	14.542	23.315	23.798	24.308	25.424	26.044	26.720
10/05/1989	6.4	0.203	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
07/07/1989	10.3	0.338	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
08/07/1989	10.3	1.111	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
26/02/1990	18.4	2.759	2.453	2.732	3.017	3.581	3.892	2.504
02/05/1991	22.1	1.931	1.325	1.493	1.683	2.347	2.685	3.061
28/01/1992	97.7	71.878	32.922	33.368	33.832	34.820	35.349	35.907
10/02/1992	26.0	6.592	2.437	2.622	2.842	3.308	3.590	3.900
17/02/1992	9.2	5.858	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
03/04/1992	17.0	2.025	0.015	0.039	0.056	0.114	0.144	0.185
04/04/1992	29.0	4.728	2.254	2.463	2.673	3.156	3.446	3.768
05/05/1994	11.2	0.109	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
08/05/1994	12.5	0.289	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
09/05/1994	22.2	1.922	0.119	0.142	0.180	0.366	0.542	0.697
11/05/1994	9.9	3.109	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
15/05/1994	15.4	3.324	0.003	0.020	0.034	0.069	0.103	0.136
18/05/1994	13.5	0.507	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
19/05/1994	17.7	0.680	0.585	0.700	0.829	1.334	1.549	1.905
20/05/1994	11.1	2.696	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
21/05/1994	8.0	0.535	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
05/06/1994	12.5	2.586	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
25/03/1995	51.4	5.023	11.127	11.593	12.086	13.239	13.854	14.531
31/03/1995	13.6	1.038	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
08/04/1995	15.2	1.572	0.000	0.000	0.000	0.000	0.049	0.064
22/05/1995	77.3	19.588	25.280	25.680	26.088	26.949	27.400	27.869
02/07/1995	22.9	0.266	0.000	0.008	0.098	0.239	0.642	1.120
22/01/1996	61.4	20.727	14.812	15.076	15.378	17.164	19.124	19.629
11/03/1996	75.0	13.529	12.329	12.531	12.732	13.588	14.114	14.702
18/04/1996	27.9	0.694	1.781	2.007	2.790	3.175	3.198	5.432
28/04/1996	37.0	18.380	1.283	1.373	1.471	1.769	2.515	2.632
13/02/2000	71.7	23.702	14.180	14.512	14.864	15.641	16.181	16.661
15/02/2000	14.2	6.705	0.000	0.000	0.000	0.000	0.005	0.046
16/02/2000	28.5	2.566	1.468	1.631	1.885	2.439	2.888	3.368
17/02/2000	7.0	1.384	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
21/02/2000	9.7	2.578	0.000	0.000	0.049	0.098	0.141	0.219
08/04/2000	20.6	12.551	0.153	0.334	0.461	0.847	0.993	1.327
11/04/2000	16.7	2.638	0.203	0.281	0.386	0.731	1.008	1.322

Data	Chuva (mm)	Lo (mm)	Lâmina calculada (mm)					
			Si = 45%	Si = 50%	Si = 55%	Si = 65%	Si = 70%	Si = 75%
28/01/2004	14.8	1.421	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.024
30/01/2004	12.1	1.091	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
05/02/2004	29.2	1.729	1.912	2.446	2.992	3.656	4.047	4.566
12/02/2004	14.1	0.504	0.986	1.147	1.422	2.066	2.441	2.873
27/02/2004	17.0	3.475	0.046	0.063	0.081	0.153	0.195	0.295
15/07/2004	43.9	4.049	4.612	5.119	5.651	7.019	7.664	9.507
29/03/2005	28.4	0.869	4.590	4.983	5.363	6.127	6.578	7.122
25/04/2005	19.6	5.896	2.280	2.478	2.754	3.322	3.608	3.942
26/04/2005	28.2	1.975	2.734	2.929	3.139	3.646	4.354	4.703
28/04/2005	41.1	7.811	5.208	5.612	63.08	7.044	7.454	7.947
14/06/2005	52.8	6.638	12.595	13.002	13.427	14.353	14.859	15.405
18/06/2005	11.4	1.256	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
05/12/2005	91.2	11.952	26.480	26.946	27.431	28.468	29.027	29.639
06/12/2005	11.9	2.803	0.000	0.000	0.000	0.036	0.054	0.080
07/12/2005	7.1	0.029	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
16/02/2006	61.5	10.15	16.022	16.295	16.758	17.595	18.095	20.022
13/05/2006	8.1	0.343	0.000	0.000	0.002	0.039	0.059	0.086
21/06/2006	32.8	4.359	3.600	3.885	4.207	5.069	5.668	6.390

Sendo; Lo: Lâmina observada e Si: saturação inicial do solo.

As Figuras 7 e 8 mostram a comparação entre a lâmina escoada calculada com a observada para as sub-bacias da Bacia Experimental de São João do Cariri, na primeira etapa de simulação de acordo com as tabelas supracitadas. Esta comparação foi realizada para todas as simulações, porém as figuras abaixo se referem apenas aos melhores resultados obtidos neste processo. Logo para a sub-bacia 01 o melhor resultado foi obtido com a saturação inicial igual a 80%, cujo coeficiente de correlação linear encontrado foi 0,728 e para a sub-bacia 02 o melhor resultado foi obtido com a saturação inicial do solo de 45% e o coeficiente de correlação linear encontrado foi de 0,757.

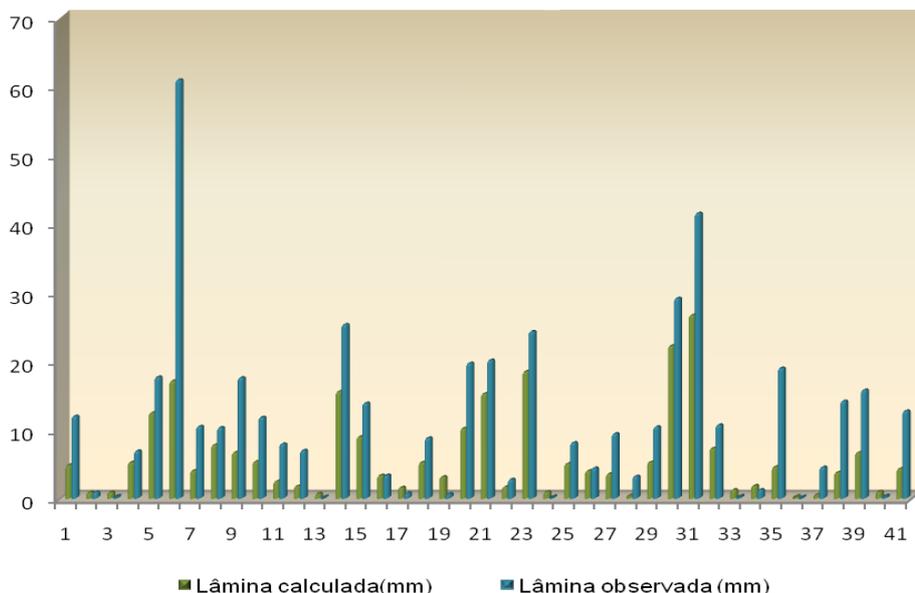


Figura 7 – Comparação entre a lâmina escoada observada e simulada para a sub-bacia 01 com saturação inicial de 80%.

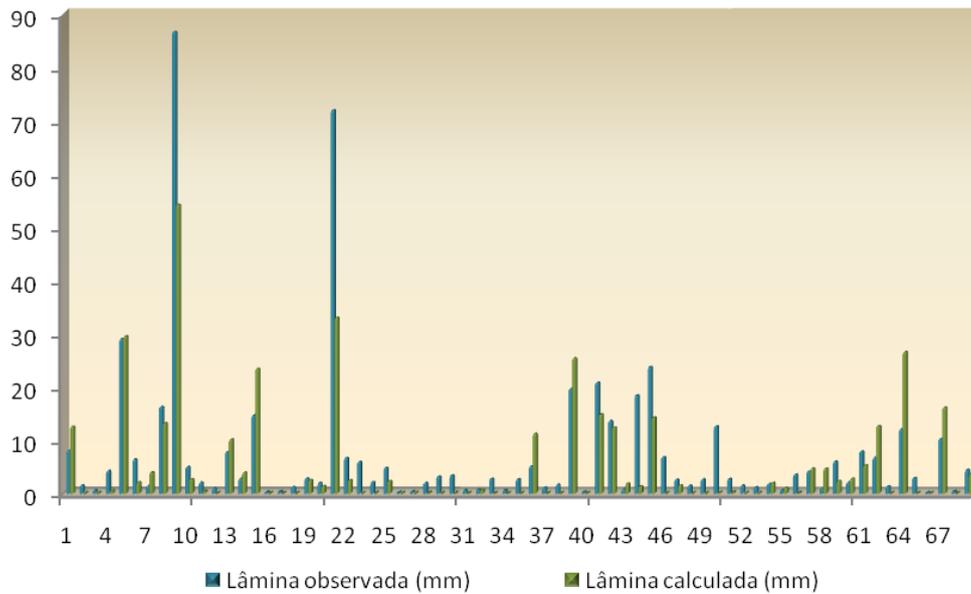


Figura 8 – Comparação entre a lâmina escoada observada e simulada para a sub-bacia 02 com saturação inicial de 45%.

Na segunda fase de simulação, a lâmina escoada foi simulada utilizando-se valores da saturação inicial que apresentaram melhores resultados na primeira etapa e valores adotados para o parâmetro relativo à condutividade hidráulica, a fim de investigar a sensibilidade deste parâmetro.

O parâmetro K_s apresentou-se bastante sensível ao modelo. Para a sub-bacia 01, foi utilizado no processo de simulação da lâmina escoada $K_s = 3 \text{ mm/h}$ e $K_s = 3,5 \text{ mm/h}$. Quando fixado o valor em 3 mm/h , para as várias combinações simuladas, este parâmetro apresentou maior sensibilidade na condição na qual $S_i = 75\%$. A figura abaixo apresenta a comparação da lâmina escoada calculada com a observada para a sub-bacia 01 da Bacia Experimental de São João do Cariri, para esta condição.

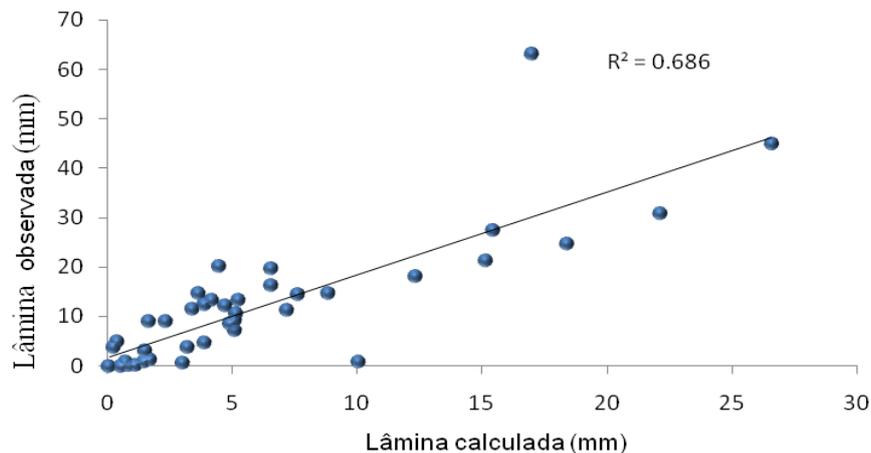


Figura 9 – Correlação entre as lâminas observadas e calculadas para a sub-bacia 01, com $K_s = 3 \text{ mm/h}$ e $S_i = 75\%$.

Com o valor de K_s fixo em $3,5 \text{ mm/h}$, nas simulações realizadas com a sub-bacia 01, este parâmetro apresentou maior sensibilidade na condição na qual $S_i = 70\%$. A Figura 10 apresenta a comparação da lâmina escoada calculada com a observada para a sub-bacia 01 da Bacia Experimental de São João do Cariri, para esta condição.

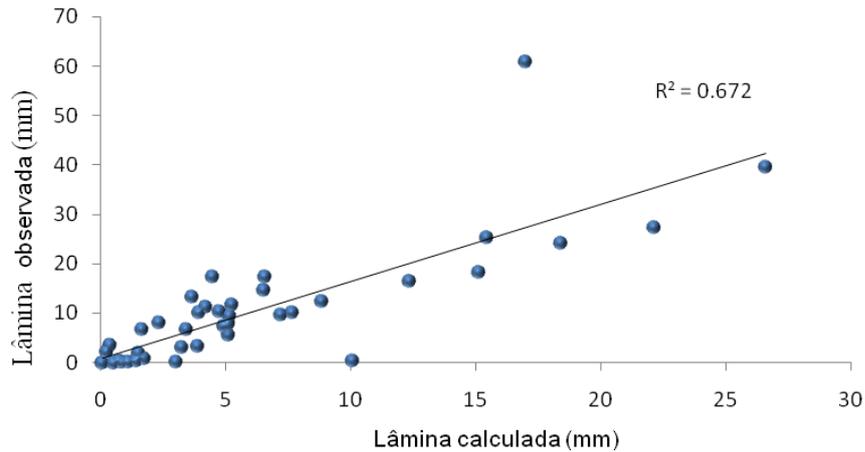


Figura 10 – Correlação entre as lâminas observadas e calculadas para a sub-bacia 01, com $K_s=3,5\text{mm/h}$ e $S_i=70\%$.

Para a sub-bacia 02, foi utilizado no processo de simulação da lâmina escoada $K_s=5,0\text{mm/h}$ e $K_s=7,0\text{mm/h}$. Quando fixado o valor em $5,0\text{mm/h}$, para as várias combinações simuladas, este parâmetro apresentou maior sensibilidade na condição na qual $S_i=35\%$. A figura abaixo apresenta a comparação da lâmina escoada calculada com a observada para a sub-bacia 02 da Bacia Experimental de São João do Cariri, para esta condição.

Figura 11 – Correlação entre as lâminas observadas e calculadas para a sub-bacia 02, com $K_s=5,0\text{mm/h}$ e $S_i=35\%$.

Com o valor de K_s fixo em $7,0\text{mm/h}$, nas simulações realizadas com a sub-bacia 02, este parâmetro apresentou maior sensibilidade na condição na qual $S_i=50\%$. A Figura 12 apresenta a comparação da lâmina escoada calculada com a observada para a sub-bacia 02 da Bacia Experimental de São João do Cariri, para esta condição.

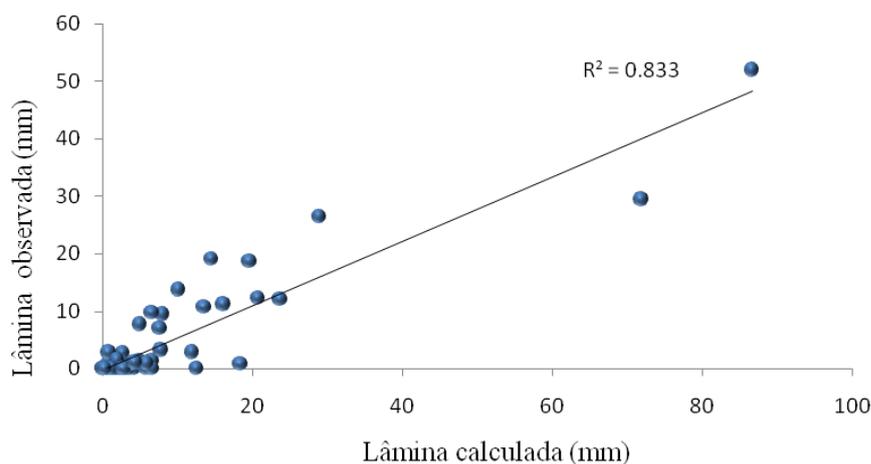


Figura 12 – Correlação entre as lâminas observadas e calculadas para a sub-bacia 02, com $K_s=7,0\text{mm/h}$ e $S_i=50\%$.

CONCLUSÕES

Neste trabalho procurou-se verificar a aplicabilidade do modelo WEPP, utilizando duas sub-bacias da Bacia Experimental de São João do Cariri, investigando-se também a sensibilidade dos parâmetros de infiltração do modelo.

O modelo WEPP mostrou-se satisfatório na modelagem do escoamento superficial, porém quanto à produção de sedimentos, o modelo possui pouca precisão. Portanto, não seria apropriado para a estimativa

de pequenas produções de sedimentos, uma vez que, a menor produção calculada pelo modelo é de 100 kg/ha.

Observa-se um efeito de escala em relação à saturação média do solo nas áreas experimentais analisadas, apesar de ser um parâmetro que representa a umidade em toda a bacia e de ser calibrado evento a evento. Os valores médios obtidos apresentaram variações com o tamanho das sub-bacias e também nas outras unidades experimentais. Desta forma, conclui-se que o efeito de escala está presente nos parâmetros de infiltração do modelo WEPP.

AGRADECIMENTOS

Ao CNPq pela bolsa de Iniciação Científica.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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

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.

FURTUNATO, O. M.; LACERDA JÚNIOR, H.B.; FIGUEIREDO, E.E. (2005). *Modelagem do escoamento em bacias do cariri paraibano com análise do efeito de escala*. In Anais do XVI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, João Pessoa.

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.

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

SANTOS, L.L. (2008) *“Modelagem hidrossedimentológica e avaliação comparativa de três modelos em pequenas sub-bacias na região semi-árida paraibana”* PPGECA/CCT/UFCG, Campina Grande.

SANTOS, C.A.G.; PAIVA, F.M.L.; NITÃO, I.A. (2004). *Modelagem hidrossedimentológica para as parcelas da Bacia Experimental de São João do Cariri*. In VII Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste, São Luís.

SANTOS, C.A.G.; SILVA, R.M.; PAIVA, F.M.L. (2005). *Modelagem Hidrossedimentológica de uma microbacia da Bacia Experimental de São João do Cariri*. In XVI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, João Pessoa.

SRINIVASAN, V. S. e SANTOS, C. A. G. e GALVÃO, C. O. (2003). *Erosão Hídrica do Solo no Semi-Árido Brasileiro: A Experiência na Bacia Experimental de Sumé*. RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos, Volume 8 n. 2.

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).