

**CAETANO CLAUDIO PEREIRA JÚNIOR**

**MODELAGEM DO ESCOAMENTO E TRANSPORTE  
DE SEDIMENTOS EM PARCELAS SOB CHUVA  
SIMULADA**

**RECIFE -PE**

**FEVEREIRO – 2011**

**CAETANO CLAUDIO PEREIRA JÚNIOR**

**MODELAGEM DO ESCOAMENTO E TRANSPORTE  
DE SEDIMENTOS EM PARCELAS SOB CHUVA  
SIMULADA**

Dissertação apresentada à Universidade Federal Rural de Pernambuco como parte das exigências do Programa de Pós-graduação em Engenharia Agrícola da Universidade Federal Rural de Pernambuco – UFRPE, para obtenção do título de Mestre em Engenharia Agrícola.

**ORIENTADOR:**

**PROF. DR. ABELARDO ANTÔNIO DE ASSUNÇÃO MONTENEGRO**

**RECIFE, FEVEREIRO DE 2011.**

## Ficha catalográfica

P436m     Pereira Júnior, Caetano Claudio  
              Modelagem do escoamento e transporte de sedimentos  
              em parcelas sob chuva simulada / Caetano Claudio Pereira  
              Júnior. -- Recife, 2011.  
              106 f. : il.

              Orientador: Abelardo Antônio de Assunção Montenegro.  
              Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) –  
              Universidade Federal Rural de Pernambuco, Departamento  
              de Tecnologia Rural, Recife, 2011.  
              Referências.

              1. Escoamento 2. Erosão 3. Produção de sedimentos  
              4. Modelos hidrossedimentológicos I. Montenegro, Abelardo  
              Antônio de Assunção, orientador II. Título

CDD 630

# **MODELAGEM DO ESCOAMENTO E TRANSPORTE DE SEDIMENTOS EM PARCELAS SOB CHUVA SIMULADA**

**CAETANO CLAUDIO PEREIRA JÚNIOR**

Dissertação defendida e aprovada pela Banca Examinadora em: 25/02/2011

Orientador:

---

Prof. Ph.D. Abelardo Antônio de Assunção Montenegro

Examinadores:

---

Prof. Dr. Richarde Marques da Silva (UFPB)  
(Examinador externo)

---

Prof. Dr. Ênio Farias de França e Silva (UFRPE)  
(Examinador interno)

---

Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. Thais Emanuelle Monteiro dos Santos (UFRPE)  
(Examinador interno)

## DEDICATÓRIA

A Deus, pela presença constante em todos os momentos da minha vida; aos meus pais, Caetano Cláudio Pereira e Maria do Socorro Pereira e a minha esposa Bárbara Bezerra Pereira, pelo apoio incondicional e pelo estímulo em todos os momentos desta caminhada.

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, por ter permitido mais esta vitória em minha vida, que fecha mais uma etapa. Por sempre ter me mostrado o caminho da luz nos momentos de dúvida e angústia. E por ter me dado força para prosseguir mesmo nos momentos que pensei em desistir ou fraquejar.

Aos meus pais, Caetano Cláudio Pereira e Maria do Socorro Campos Pereira, principais responsáveis por toda minha formação, pois sem eles não teria conseguido trilhar este caminho árduo de forma reta, sempre me apoiando e orientando no caminho do bem. E a minha irmã, Juliana Campos Pereira, pelo companheirismo e compartilhamento de tristezas e alegrias.

A minha esposa, Bárbara Bezerra Pereira, pelo amor, carinho, dedicação e apoio incondicionais, durante o curso, compreendendo meus muitos momentos de ausência e solidão, nos inúmeros dias que lhe privei da minha companhia em prol de desenvolver um trabalho de qualidade. Saiba que tudo é em prol do nosso futuro.

A todos meus amigos e familiares, os quais não citarei nomes para não cometer injustiça, os quais o apoio e amizade foram cruciais durante este difícil período.

Ao professor orientador Abelardo Antônio de Assunção Montenegro, por usufruir de sua vasta experiência e sabedoria, em todos os momentos e por sua total paciência e compreensão das minhas inúmeras limitações durante a nossa jornada rumo à conclusão deste trabalho.

A amiga e “co-orientadora” Thais Emanuelle Monteiro dos Santos pela ajuda e apoio, durante anos de trabalho em conjunto.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola que contribuíram na minha formação e sempre estiveram prontos a ajudar no que fosse necessário.

A todos os funcionários do Departamento de Tecnologia Rural, pela receptividade e pelo auxílio sempre prestado, principalmente aos amigos Lulinha e Júnior Granja

À Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE), pelo apoio institucional e ao CNPq, pela concessão da bolsa de estudos.

Às pessoas que fazem parte do grupo de pesquisa do Laboratório de Água e Solo (LABAS) que participaram direta ou indiretamente. Pelos momentos de amizade, aprendizagem e descontração. Prof<sup>o</sup> Abelardo, Thais, Roberto (Betinho), Júlio, Rogério, Adriano, Adriana, Carla, Robertson, Rafael, Diogo, Tatiana, Tatyana Keyty e Eduardo, pelo apoio e estímulo recebidos.

Aos colegas de mestrado, Marcelo, Irenilson, Patrícia, Gledson, pelos trabalhos em parcerias realizados e pela ajuda e disponibilidade durante a pesquisa.

Aos avaliadores, Richarde Marques da Silva, Ênio Farias França, Thais Monteiro dos Santos e Suzana Montenegro, pelas contribuições para a melhoria deste trabalho.

Por fim, agradeço a todos aqueles, que de alguma forma, contribuíram para a conclusão desta pesquisa.

## SÚMARIO

<b>LISTA DE FIGURAS.....</b>	<b>IX</b>
<b>LISTA DE TABELAS.....</b>	<b>XI</b>
<b>LISTA DE SÍMBOLOS.....</b>	<b>XII</b>
<b>RESUMO .....</b>	<b>20</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>21</b>
<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>22</b>
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>27</b>
2.1 Escoamento Superficial, Produção de Sedimentos e os Mecanismos de Geração.....	27
2.2 A Região Semiárida do Brasil.....	30
2.3 Modelagem Hidrológica.....	32
2.3.1 Classificação dos modelos.....	32
2.3.2 Utilização dos modelos hidrológicos de base física no semiárido nordestino.....	38
<b>3. MODELO APLICADO NESTA PESQUISA.....</b>	<b>41</b>
3.1 Cálculo de infiltração do solo no modelo Kineros2.....	42
3.2 Fluxos nos planos.....	45
3.3 Fluxos nos canais.....	46
3.4 Modelagem da erosão nos planos e canais.....	46
3.5 Dados de entrada do Modelo Kineros2 (1990).....	49
3.6 Parâmetros de entrada do Modelo Kineros2 (1990).....	50
3.6.1 Parâmetros globais.....	51
3.6.2 Parâmetros dos planos.....	52
<b>4. MATERIAL E MÉTODOS.....</b>	<b>55</b>
4.1 Caracterização da área de estudo.....	55
4.2 Parcelas de Erosão.....	57
4.2.1 Dados coletados nas parcelas de erosão.....	58
4.3 Determinação dos parâmetros do modelo Kineros2 (1990).....	62



<b>5. RESULTADOS.....</b>	<b>68</b>
<b>6. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....</b>	<b>88</b>
<b>7. CONCLUSÕES.....</b>	<b>92</b>
<b>8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>93</b>

## LISTAS DE FIGURAS

Figura 1. Janela do modelo, Kineros2 (1990).....	42
Figura 2. Exemplo de um arquivo de entrada de chuva do modelo Kineros2 (1990) .....	50
Figura 3. Exemplo de um arquivo de entrada de parâmetros do modelo Kineros2 (1990).	51
Figura 4. Bacia hidrográfica do Mimoso localizada na Bacia do Ipanema.....	55
Figura 5. Esquema experimental dos tratamentos. Fonte: Santos, 2006 .....	58
Figura 6. Calibração da Vazão para os eventos D1, D2 e D3 respectivamente da BRM em parcela experimental .....	73
Figura 7. Calibração da Vazão para os eventos CN1, CN2 e CN 3 respectivamente da BRM em parcela experimental.....	74
Figura 8. Calibração da Vazão para os eventos MA 11, MA 12 e MA13 respectivamente da BRM em parcela experimental.....	75
Figura 9. Calibração da Vazão para os eventos MA 21, MA 22 e MA 23 respectivamente da BRM em parcela experimental. ....	76
Figura 10. Calibração da Vazão para os eventos MA 31, MA 32 e MA 33 respectivamente da BRM em parcela experimental.....	77
Figura 11. Calibração da Vazão para os eventos CM 11, CM 12 e CM 13 respectivamente da BRM em parcela experimental.....	78
Figura 12. Calibração da Vazão para os eventos CM 21, CM 22 e CM 23 respectivamente da BRM em parcela experimental.....	79
Figura 13. Calibração da Vazão para os eventos CM 31, CM 32 e CM 33 respectivamente da BRM em parcela experimental.....	80
Figura 14. Calibração da Vazão para os eventos NB1 11, NB1 12 e NB1 13 respectivamente da BRM em parcela experimental.....	81

Figura 15. Calibração da Vazão para os eventos NB1 21, NB1 22 e NB1 23 respectivamente da BRM em parcela experimental.....	82
Figura 16. Calibração da Vazão para os eventos NB1 31, NB1 32 e NB1 33 respectivamente da BRM em parcela experimental.....	83
Figura 17. Calibração da Vazão para os eventos NB2 11, NB2 12 e NB2 13 respectivamente da BRM em parcela experimental.....	84
Figura 18. Calibração da Vazão para os eventos NB2 21, NB2 22 e NB2 23 respectivamente da BRM em parcela experimental.....	85
Figura 19. Calibração da Vazão para os eventos NB2 31, NB2 32 e NB2 33 respectivamente da BRM em parcela experimental.....	86

**LISTAS DE TABELAS**

Tabela 1. Características físicas do solo na área experimental.....	57
Tabela 2. Dados coletados nas parcelas de erosão.....	60
Tabela 3. Parâmetros não calibrados dos modelos foram estabelecidos de acordo com as características de cada parcela experimental.....	68
Tabela 4. Parâmetros $G$ e $cf$ obtidos para todos os eventos de calibração para as parcelas de erosão nas diferentes fases desenvolvimento da cultura do feijoeiro na BRM.....	70
Tabela 5. Valores do coeficiente de determinação Nash e Sutcliffe ( $R^2$ ) obtidos na calibração dos eventos individuais de escoamento superficial.....	87

**LISTA DE SÍMBOLOS**

- A* Área de seção transversal do fluxo
- a* Fator de erodibilidade do solo nos canais
- B* Combinado dos efeitos do potencial efetivo de capilaridade, profundidade do fluxo e armazenamento de água do solo.
- C* Fator cobertura ou controle
- C<sub>D</sub>* Coeficiente de arrasto
- cf* Coeficiente na equação de erosão devido ao impacto das gotas de chuva
- cg* Coeficiente da taxa de transferência na erosão/deposição hidráulica
- C<sub>m</sub>* Concentração de equilíbrio na capacidade de transporte de sedimentos
- CM 11 Feijoeiro em nível com cobertura morta, fase fenológica da cultura crescimento, parcela 1
- CM 12 Feijoeiro em nível com cobertura morta, fase fenológica da cultura crescimento, parcela 2
- CM 13 Feijoeiro em nível com cobertura morta, fase fenológica da cultura crescimento, parcela 3
- CM 21 Feijoeiro em nível com cobertura morta, fase fenológica da cultura florescimento, parcela 1
- CM 22 Feijoeiro em nível com cobertura morta, fase fenológica da cultura florescimento, parcela 2
- CM 23 Feijoeiro em nível com cobertura morta, fases fenológica da cultura florescimento, parcela 3

CM 31 Feijoeiro em nível com cobertura morta, fase fenológica da cultura VAGENS, parcela 1

CM 32 Feijoeiro em nível com cobertura morta, fase fenológica da cultura VAGENS, parcela 2

CM 33 Feijoeiro em nível com cobertura morta, fase fenológica da cultura VAGENS, parcela 3

CN 1 Cobertura natural, parcela 1

CN 2 Cobertura natural, parcela 2

CN 3 Cobertura natural, parcela 3

*co* Coeficiente relacionado à coesão do solo

*Cs* Concentração de sedimentos no fluxo

*Cv* Coeficiente de variação da condutividade hidráulica efetiva do solo

*d* Tamanho característico dos sedimentos

D1 Desmatada, parcela 1

D2 Desmatada, parcela 2

D3 Desmatada, parcela 3

*d<sub>50</sub>* Diâmetro médio dos sedimentos

*e* Erosão calculada

*eh* Erosão devido ao arrasto pelo fluxo superficial

*eo* Erosão observada

*es* Erosão devido ao impacto das gotas de chuva

*Ec* Produção de sedimento calculada

*Eo* Produção de sedimento observada

*fc* Taxa de infiltração

*g* Aceleração da gravidade

- G* Valor efetivo do potencial de capilaridade
- h* Profundidade do fluxo
- I* Infiltração acumulada
- i* Intensidade de precipitação
- K* Condutividade hidráulica do solo
- K<sub>i</sub>* Parâmetro de erodibilidade do solo pelo impacto das gotas de chuva
- K<sub>r</sub>* Parâmetro de erodibilidade do solo pelo fluxo superficial
- K<sub>s</sub>* Condutividade hidráulica saturada efetiva
- L* Comprimento do plano
- L<sub>c</sub>* Lâmina calculada
- L<sub>o</sub>* Lâmina observada
- m* Expoente na relação entre vazão e profundidade do fluxo ou entre vazão e área da secção transversal do canal.
- MA 11 Feijoeiro cultivado morro abaixo, fase fenológica da cultura crescimento, parcela 1
- MA 12 Feijoeiro cultivado morro abaixo, fase fenológica da cultura crescimento, parcela 2.
- MA 13 Feijoeiro cultivado morro abaixo, fase fenológica da cultura crescimento, parcela 3
- MA 21 Feijoeiro cultivado morro abaixo, fase fenológica da cultura florescimento, parcela 1
- MA 22 Feijoeiro cultivado morro abaixo, fase fenológica da cultura florescimento, parcela 2

MA 23 Feijoeiro cultivado morro abaixo, fase fenológica da cultura florescimento, parcela 3

MA 31 Feijoeiro cultivado morro abaixo, fase fenológica da cultura VAGENS, parcela 1

MA 32 Feijoeiro cultivado morro abaixo, fase fenológica da cultura VAGENS, parcela 1

MA 33 Feijoeiro cultivado morro abaixo, fase fenológica da cultura VAGENS, parcela 1

$n$  Coeficiente de rugosidade de Manning

$N_s$  Parâmetro de sucção/umidade do solo

NB1 11 Feijoeiro em nível com barramentos de pedra entre cada fileira de plantio do feijoeiro, no espaçamento de 0,5 m, fase fenológica da cultura crescimento, parcela 1

NB1 12 Feijoeiro em nível com barramentos de pedra entre cada fileira de plantio do feijoeiro, no espaçamento de 0,5 m, fase fenológica da cultura crescimento, parcela 2

NB1 13 Feijoeiro em nível com barramentos de pedra entre cada fileira de plantio do feijoeiro, no espaçamento de 0,5 m, fase fenológica da cultura crescimento, parcela 3

NB1 21 Feijoeiro em nível com barramentos de pedra entre cada fileira de plantio do feijoeiro, no espaçamento de 0,5 m, fase fenológica da cultura florescimento, parcela 1

NB1 22 Feijoeiro em nível com barramentos de pedra entre cada fileira de plantio do feijoeiro, no espaçamento de 0,5 m, fase fenológica da cultura florescimento, parcela 2



- NB1 23 Feijoeiro em nível com barramentos de pedra entre cada fileira de plantio do feijoeiro, no espaçamento de 0,5 m, fase fenológica da cultura florescimento, parcela 3
- NB1 31 Feijoeiro em nível com barramentos de pedra entre cada fileira de plantio do feijoeiro, no espaçamento de 0,5 m, fase fenológica da cultura VAGENS, parcela 1
- NB1 32 Feijoeiro em nível com barramentos de pedra entre cada fileira de plantio do feijoeiro, no espaçamento de 0,5 m, fase fenológica da cultura VAGENS, parcela 2
- NB1 33 Feijoeiro em nível com barramentos de pedra entre cada fileira de plantio do feijoeiro, no espaçamento de 0,5 m, fase fenológica da cultura VAGENS, parcela 3
- NB2 11 Feijoeiro em nível com barramentos de pedra entre cada fileira de plantio do feijoeiro, no espaçamento de 1,0 m, fase fenológica da cultura crescimento, parcela 1
- NB2 12 Feijoeiro em nível com barramentos de pedra entre cada fileira de plantio do feijoeiro, no espaçamento de 1,0 m, fase fenológica da cultura crescimento, parcela 2
- NB2 13 Feijoeiro em nível com barramentos de pedra entre cada fileira de plantio do feijoeiro, no espaçamento de 1,0 m, fase fenológica da cultura crescimento, parcela 3
- NB2 21 Feijoeiro em nível com barramentos de pedra entre cada fileira de plantio do feijoeiro, no espaçamento de 1,0 m, fase fenológica da cultura florescimento, parcela 1

- NB2 22 Feijoeiro em nível com barramentos de pedra entre cada fileira de plantio do feijoeiro, no espaçamento de 1,0 m, fase fenológica da cultura florescimento, parcela 2
- NB2 23 Feijoeiro em nível com barramentos de pedra entre cada fileira de plantio do feijoeiro, no espaçamento de 1,0 m, fase fenológica da cultura florescimento, parcela 3
- NB2 31 Feijoeiro em nível com barramentos de pedra entre cada fileira de plantio do feijoeiro, no espaçamento de 1,0 m, fase fenológica da cultura VAGENS, parcela 1
- NB2 32 Feijoeiro em nível com barramentos de pedra entre cada fileira de plantio do feijoeiro, no espaçamento de 1,0 m, fase fenológica da cultura VAGENS, parcela 2
- NB2 33 Feijoeiro em nível com barramentos de pedra entre cada fileira de plantio do feijoeiro, no espaçamento de 1,0 m, fase fenológica da cultura VAGENS, parcela 3
- $\phi$  Porosidade
- $q$  Fluxo de entrada lateral por unidade de comprimento do canal ou excesso de precipitação nos planos
- $Q$  Descarga por unidade de largura
- $qs$  Entrada lateral de sedimentos no canal
- $R$  Raio hidráulico
- $r$  Taxa de entrada de água na superfície do solo durante a redistribuição de água
- $re$  Excesso de precipitação
- $Rn$  Número de Reynolds da partícula

$S$	Declividade
$Sat$	Saturação
$Sf$	Declividade da linha de energia
$Si$	Saturação inicial relativa do solo
$So$	Declividade do plano ou do fundo do canal
$S_s$	Densidade relativa do sedimento
$Tc$	Capacidade de transporte de sedimentos pelo escoamento
$t$	Tempo de precipitação
$tp$	Tempo de empoçamento
$T_w$	Largura de topo do fluxo
$u$	Velocidade média do fluxo
$vs$	Velocidade de queda das partículas
$W$	Largura do plano
$x$	Distância na direção do fluxo
$x$	Comprimento da encosta
$Z$	Profundidade da frente de molhamento a partir da superfície
$\alpha$	Tipo do solo
$\beta$	Fator de forma
$\delta$	Coefficiente para a tensão de cisalhamento crítico
$\Delta\theta$	Armazenamento de água no solo
$\Delta\theta_{to}$	Diferença de umidade do solo acima e abaixo da frente de molhamento
$\gamma$	Peso específico da água
$\gamma_s$	Peso específico dos sedimentos
$\lambda$	Índice de distribuição dos tamanhos dos poros

$\nu$	Viscosidade cinemática da água
$\Omega$	Potência unitária do fluxo
$\delta$	Coefficiente para cálculo da tensão de cisalhamento crítica
$\psi$	Potencial mátrico do solo
$\tau$	Tensão cisalhante atuando nas partículas de solo em decorrência do escoamento
$\tau_c$	Tensão de cisalhamento crítica média
$\varepsilon_c$	Coefficiente de deposição nos canais
$\varepsilon_p$	Coefficiente de deposição nos planos
$\theta$	Umidade do solo no período de redistribuição de água
$\theta_r$	Umidade residual do solo
$\theta_s$	Umidade de saturação do solo
$\theta_i$	Umidade inicial do solo
$\theta_o$	Umidade do solo acima da frente de molhamento

## RESUMO

A previsão do escoamento superficial e da erosão do solo nas bacias em regiões semiáridas é indispensável nos processos de planejamento, aproveitamento e gestão dos recursos naturais. Modelos hidrossedimentológicos de base física, que possam considerar os efeitos das mudanças de uso do solo fornecem, através da modelagem dos processos, um excelente meio para esse fim. Esta pesquisa teve com objetivo avaliar os parâmetros do modelo Kinos2 para as parcelas experimentais localizadas na Bacia Representativa do Mimoso (BRM), no Município de Pesqueira, no Agreste de Pernambuco, através da calibração de simulações numéricas, buscando a melhor representação nos processos envolvidos no escoamento. Na área em estudo há 18 parcelas experimentais, sendo cada parcela com 1 x 3 m, com diferentes tipos de cobertura vegetal. Cada parcela experimental recebeu um total de três chuvas simuladas, que geraram 42 eventos, com produção de escoamento superficial e de sedimentos. Os parâmetros de distribuição de água no solo  $G$  (capilaridade) e de mesma forma o parâmetro  $cf$ , o qual é relativo ao cálculo da erosão por impacto das gotas de chuva, foram calibrados em cada evento, até que os valores da lâmina escoada e a produção de sedimentos calculados se aproximassem dos valores observados. Neste trabalho, o coeficiente de determinação de Nash-Sutcliffe para resultados escoamento superficial variou entre 0,47 e 0,92, em 88% dos eventos analisados, com um valor médio 0,61. Os resultados encontrados neste estudo podem ser considerados satisfatórios, devido ao fato das dimensões da área em estudo serem bastante reduzidos e quando comparados com outros trabalhos da literatura.

**Palavras chave:** escoamento, erosão, produção de sedimentos e modelos hidrossedimentológicos.

## **ABSTRACT**

The predicted runoff and soil erosion in semiarid basins is essential in planning, management and exploitation of natural resources. Physically based hydrological models that can consider the effects of changes in land use constitute excellent tools to that end. This study has evaluated the model parameters for Kineros2 at Mimoso Representative Basin (BRM) in city of Pesqueira, Pernambuco, through the calibration of numerical simulations, seeking the best representation in the processes involved in the flow. In the study area there are 18 plots, each plot with 1 x 3 m, with different types of vegetation. Each plot received a total of three simulated rainfall, which generated 42 events with production of runoff and sediments. The parameters of water distribution in soil G (capillarity) and similarly the parameter  $c_f$ , which is on the calculation of erosion by impact of raindrops, were calibrated for each event, until the values of flow production and drained calculated sediment were close enough to the values observed. In this study, the coefficient of determination of Nash-Sutcliffe results for runoff ranged between 0.47 and 0.92, 88% of the analyzed events, with an average value of 0.61. The results of this study can be considered satisfactory, due to the reduced dimensions of the study area low and when compared with other works from literature.

**Keywords:** runoff, sediment yield and runoff-erosion models.

## 1. INTRODUÇÃO

A região semiárida do Nordeste brasileiro apresenta limitada disponibilidade de recursos hídricos, caracteriza-se por ter solos rasos situados acima de embasamentos cristalinos, que encharcam na chuva e ressecam facilmente nos períodos de estiagem. A vegetação típica é a caatinga, e o clima tropical quente, apresentando elevados índices de evapotranspiração durante todo o ano e grandes variações pluviométricas. Apesar de estocásticos, os eventos chuvosos apresentam-se em algumas épocas e locais com grande intensidade, o que associado à baixos índices de cobertura vegetal devido a ações antropicas desmatamento da cobertura natural, solos com alto grau de erodibilidade, resultam em eventos erosivos de grande magnitude (Melo Filho & Souza, 2006). A produtividade média das atividades agropecuárias nessa região é muito baixa, chegando a níveis baixíssimos em períodos de seca (PADILHA, 2000).

Segundo Couto et al. (1996), o Nordeste Brasileiro abriga mais da metade dos estabelecimentos rurais de base familiar do país. São mais de 2 milhões de estabelecimentos que ocupam mais de dois terços do pessoal rural ativo e são responsáveis por cerca de 33% do valor da produção agrícola regional, embora só ocupem 31% da área total e recebam apenas pouco mais de 8% do total dos financiamentos.

Nessa região, os solos apresentam alta susceptibilidade à erosão, particularmente nas áreas com cultivos agrícolas, com degradação de solos das encostas e agregação de solos nos vales. Cabe destacar a carência de estudos que analisem o efeito da morfologia das encostas sobre o risco de degradação, considerando a configuração da

rede de drenagem, bem como o efeito da sazonalidade da cobertura vegetal. Com o aumento excessivo da concentração de sólidos e da descarga sólida dos mananciais, pode ocorrer com o tempo o assoreamento, que além de modificar ou deteriorar a qualidade da água, a fauna e a flora (CARVALHO et al, 2000), provoca o decréscimo da velocidade da água, resultando também em redução da disponibilidade hídrica.

A determinação da erosão em áreas rurais nativas e sob condições dos diferentes usos tem um grande significado para o planejamento dos recursos hídricos e o desenvolvimento do meio ambiente. Altas taxas de erosão removem grandes quantidades de solo dos horizontes superficiais dos solos e reduzem seriamente a produtividade agrícola e florestal, e ainda, aumentam o transporte de poluentes para a rede de drenagem (SIMONS e SENTURK, 1992). Cerda e Lasanta (2005) e Erskine et al.(2002) comentam que o aporte de sedimentos oriundos nas bases de drenagem, é muitas vezes mal compreendido, sendo uma das razões para isso, a falta de dados de boa qualidade de escoamento superficial e da dinâmica do sedimento, como também, a falta da ligação entre os processos que ocorrem nas fontes de sedimentos nas vertentes com a produção de sedimentos da bacia. Portanto, o entendimento das relações de erosão de vertente cultivadas de microbacias semiáridas, é essencial para determinar o quanto o sistema de produção agrícola convencional afeta a produção de sedimentos.

Devido ao Nordeste localizar-se numa zona tropical, verifica-se que os processos relacionados à erosão e à vazão repercutem sobre o desenvolvimento regional, uma vez que podem causar danos à agricultura, às diversas outras atividades econômicas e ao próprio meio ambiente. Os prejuízos, sob o ponto de vista da perda de solo, contribuem para a degradação ambiental à medida que podem provocar: (a) redução da qualidade da água pela presença de sedimentos e suas associações com agrotóxicos e nutrientes; (b)



assoreamento de córregos e lagos; (c) enchentes; e (d) inundações causadas por alterações no regime fluvial, as quais afetam a fauna, a flora e as atividades humanas (SILVA et al., 2003; GUERRA, 2005).

O conhecimento do comportamento hidrossedimentológico de uma bacia hidrográfica é fundamental para a adequação e gestão de seus recursos hídricos, bem como para o suporte à decisão sobre o uso e ocupação do solo. O acompanhamento dos fluxos de sedimentos ocorridos em um dado local da bacia permite o diagnóstico de eventuais impactos em sua área de drenagem ao longo do tempo, podendo tornar-se importante indicador ambiental.

Objetivando um melhor entendimento dos processos de erosão e escoamento superficial e quais as modificações geradas por esses processos no meio ambiente, duas alternativas têm sido bastante utilizadas: a análise das respostas hidrológicas em bacias parcelas representativas e experimentais; e o uso de modelos que representem os processos físicos com base em dados observados, para simular as consequências devido às mudanças no clima e no uso da terra (SANTOS, 2008).

Para contornar as dificuldades encontradas na obtenção de dados, tem sido incentivada a instalação de bacias experimentais e representativas de uma região (SRINIVASAN et al., 2004). Assim, através de uma função de transferência, os resultados obtidos nas escalas menores poderão ser transpostos para as escalas maiores e não monitoradas. Tanto o conhecimento de culturas adequadas para uma determinada região como o conhecimento de meios de conservação, são fundamentais para prevenir os processos erosivos e, posteriormente, o processo de desertificação.

Desde do ano de 1970, tem-se alcançado um 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).

Nos últimos anos, o uso desses modelos tem-se acentuado, com crescente interesse por estudos de impactos ambientais causados pelas atividades humanas, que tem levado um considerável número de pesquisadores a estudar novas ferramentas, inclusive aquelas que buscam simular as transformações ocorridas através das mudanças no uso da água e do solo.

A distribuição espacial dos processos erosivos e de produção de sedimentos é de grande importância nos estudos das bacias hidrográficas, pois através desses é possível associar relações entre padrões geomorfológicos de bacias vertentes com a identificação de áreas de mobilização e deposição de sedimentos (SALVIANO et al., 1998). Para tal fim, as medições em campo são de fundamental importância para validar modelos hidrossedimentológicos (BANDEIRA, 1998).

A utilização desses modelos é particularmente importante devido ao fato da escassez de dados hidrológicos e sedimentológicos em períodos contínuos e de extensão temporal suficiente para o desenvolvimento de estudos hidrossedimentológicos. Esses modelos, devidamente calibrados e validados a partir de séries de dados observados de escoamento superficial e erosão, constituem-se numa importante fonte de conhecimento da variação ao longo do tempo das vazões e da produção de sedimentos em bacias hidrográficas (SEIXAS & SANTOS, 2007). Além do mais, o uso de modelos distribuídos permite que toda a área da bacia seja dividida em unidades regulares ou irregulares, assumidas como homogêneas, reconhecendo desta forma a distribuição espacial das características físicas do solo, da vegetação e climáticas.

Existem, na literatura, diversos modelos hidrossedimentológicos e quase sempre estes modelos fornecem resultados diferentes quando aplicados a uma bacia específica. Portanto, a escolha de um modelo de simulação mais apropriado para uma região depende, não somente dos princípios conceituais do modelo, mas também da sua robustez, precisão, consistência e facilidade de parametrização. De acordo com os conceitos em que foram baseados, os modelos poderão ser ou não robustos, precisos e consistentes (PAIVA, 2008). Dessa forma, a utilização de modelo de base física hidrossedimentológicos distribuídos, trará subsídios para a análise do comportamento dos processos de geração de escoamento e perdas de solo em bacias do semiárido.

A crescente utilização do modelo de base física KINEROS2, para prever a resposta hidrossedimentológica em bacias hidrográficas em regiões semiáridas, foi fato determinante para a escolha do mesmo como instrumento de predição dos processos de escoamento superficial e produção de sedimentos. Dentre os estudos que utilizaram o modelo KINEROS2 pode-se citar Kalin et al. (2003), Martínez-Carreras et al. (2007), Silva & Santos (2008) e Al-Qurashi et al. (2008).

Este trabalho tem como objetivo a simulação do escoamento superficial e do transporte de sedimentos, bem como a avaliação do modelo KINEROS2 e calibração dos parâmetros, em escala de parcela, para uma bacia experimental do semiárido nordestino.

## **2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1 Escoamento Superficial, Produção de Sedimentos e Seus Mecanismos de Geração**

O escoamento superficial é a parcela do ciclo hidrológico em que a água se desloca na superfície da bacia até encontrar uma calha definida. É um fenômeno físico resultado da interação da precipitação com a bacia hidrográfica, resultando no movimento da água sobre a superfície do solo. Quando a bacia é rural e possui cobertura vegetal, o escoamento sofre a interferência dessa cobertura, e grande parte dele se infiltra. O escoamento em superfícies urbanas é regido pela interferência do homem através de superfícies impermeáveis e sistemas de esgotos pluviais (TUCCI, 2005). O planejamento e alocação dos recursos hídricos superficiais estão intimamente ligados ao escoamento superficial, tornando o conhecimento desse processo imprescindível para a melhor utilização dos recursos hídricos das bacias hidrográficas, principalmente onde os índices de precipitação são baixos.

As características das precipitações, como duração e intensidade, as características do solo, como textura, capacidade de infiltração, umidade e a cobertura vegetal influenciam o escoamento superficial, que basicamente é regido por leis físicas (conservação da massa, energia e quantidade de movimento) e representado quantitativamente pelas variáveis vazão, profundidade e velocidade.

A infiltração é a passagem de água da superfície para o interior do solo, dependendo do estado da superfície e das quantidades de água e ar inicialmente presentes no interior do solo (TUCCI, 1993). À medida que a água infiltra pela superfície, as camadas superiores do solo vão se umedecendo de cima para baixo,

alterando gradativamente o perfil de umidade. Enquanto há entrada de água, o perfil de umidade tende à saturação em toda a profundidade. Normalmente, as precipitações naturais não são capazes de saturar todo perfil, saturando em geral apenas as camadas próximas à superfície, formando um perfil típico onde a umidade do solo decresce com a profundidade (SANTOS, 1994).

Existem várias equações que descrevem a variação da infiltração de água no solo em relação ao tempo, dentre elas, têm-se as equações de Horton (1933), Phillip (1957, 1969), Green & Ampt (1911) e Smith & Parlange (1978).

Beskow et al. (2009) descreveram que a água é um dos mais significantes agentes causadores do processo de degradação ambiental, promovendo a erosão laminar e entre sulcos. A primeira ocorre quando as partículas do solo são impactadas pelas gotas da chuva, transportando o solo em pequenas lâminas, enquanto a segunda promove o transporte dos sedimentos através de um fluxo concentrado. Com isso, diminui-se a produtividade do solo, promovendo o transporte de nutrientes e agrotóxicos, contaminando assim os corpos de água. A forma de erosão mais comum no Brasil é a hídrica, principalmente devido às chuvas, dependendo da sua intensidade, duração e frequência.

O conhecimento da produção de sedimentos em bacias hidrográficas é extremamente importante no planejamento e gestão dos recursos hídricos. Tais informações são fundamentais no dimensionamento e operação de obras hidráulicas, interferindo decisivamente nos custos de implantação e manutenção de tais sistemas (BELLINASSO & PAIVA, 2007). Produção de sedimentos, segundo Vanoni (1975), pode ser definida como o total de sedimentos saído de uma bacia hidrográfica, mensuráveis em um ponto de referência e por um período de tempo especificado. Pode ser expressa em termos absolutos ( $t \text{ ano}^{-1}$ ), ou em termos de área específica ( $t.ha^{-1}ano^{-1}$ ).

A erosão dos solos compreende os processos de desagregação, transporte e deposição das partículas sólidas componentes da superfície do solo. A desagregação diz respeito ao desprendimento de partículas sólidas do meio de que fazem parte, devido principalmente ao impacto das gotas de chuva, além de outros fatores, tais como: reações químicas, flutuação de temperatura e ações mecânicas. O material erodido fica exposto à ação do vento ou do escoamento superficial, ou mesmo a ação de outras chuvas, disponível para ser transportado. Após a ação do homem, o impacto das gotas de chuva é o fator que mais contribui para a erosão. O transporte através da água pode acontecer de várias maneiras, dependendo do fluxo e das características das partículas de solo. Partículas de solo pesadas são transportadas por deslizamento, rolamento ou saltos. Partículas muito leves são transportadas em suspensão no interior do fluxo e constituem a carga de lavagem. A deposição acontece quando a quantidade de partículas presente no fluxo é maior que a capacidade que o fluxo possui para transportar a massa sólida. Ela geralmente acontece em deltas de rios e em áreas onde a velocidade do fluxo é bastante reduzida. Essa concentração de sedimentos em equilíbrio no fluxo superficial é denominada de capacidade de transporte de sedimentos (SIMONS & SENTÜRK, 1992).

Os processos de desagregação, transporte e deposição ocorrem, basicamente, nas áreas planas. As gotas de chuva ao caírem, atingem uma velocidade, cujo valor está associado a uma energia cinética. Esta energia será dissipada quando as gotas atingirem a superfície do solo. Dependendo das condições da cobertura superficial (com ou sem vegetação) este impacto provocará ou não a desagregação das partículas. Essas poderão ser transportadas pelas gotas, sendo arremessadas após o impacto, a uma curta distância. Isto faz com que algumas vezes o fluxo possa transportar mais material do que a sua capacidade de transporte (FOSTER, 1982).

Já a erosão nos canais acontece devido à força de cisalhamento que o fluxo superficial exerce nas laterais e no leito do canal. Parte do material que foi erodido nos planos é transportado juntamente com o fluxo para os canais. Dependendo da quantidade disponível para transporte e das características do solo que compõe o leito e as laterais do canal, poderá haver maior ou menor erosão. Conseqüentemente, a erosão irá resultar no aprofundamento e alargamento do canal (SANTOS, 1994).

## **2.2 A Região Semiárida do Brasil**

No Brasil a área classificada oficialmente como semiárido aumentou de 892.309,4 para 969.589,4 km<sup>2</sup>, segundo Ministério da Integração Nacional (BRASIL, 2005; 2007) o equivalente a 62% da área total da região Nordeste e cerca de 11,40% do território nacional, sendo um dos maiores e mais populosos. O semiárido brasileiro é um dos mais úmidos do planeta, com média anual de 700 mm ano<sup>-1</sup>, enquanto na maioria das zonas áridas de outros países a média anual é de 80 a 250 mm ano<sup>-1</sup> (MELO FILHO & SOUZA, 2006). Nesse contexto, vale destacar alguns trabalhos no que diz respeito à região semiárida do Brasil. Menezes et al. (2010) descreveram que a grande variabilidade anual e interanual da precipitação são características marcantes na região Nordeste do Brasil (NEB); uma outra característica do Nordeste é a variabilidade espacial dos valores totais de precipitação, pois há porções da região que apresentam precipitação acumulada inferior a 350 mm ano<sup>-1</sup>, a exemplo do Cariri Paraibano. De acordo com Silva et al. (2009), o problema da irregularidade pluviométrica no NEB resulta não só da variação dos totais pluviométricos, mas, principalmente, da duração e intensidade dessas precipitações.

O desmatamento indiscriminado para a formação de novas lavouras, aliadas à retirada de madeira para benfeitorias, lenha e carvão, e às queimadas sucessivas com manejo inadequado do solo tem contribuído, juntamente com as secas prolongadas, para comprometer o frágil equilíbrio do meio ambiente da região semiárida. A destruição da caatinga na região semiárida do Nordeste brasileiro tem contribuído para acelerar a erosão do solo, trazendo, como consequências, o seu empobrecimento e o assoreamento de mananciais (ALBUQUERQUE et al., 2001).



## **2.3 Modelagem Hidrossedimentológicas**

### **2.3.1 - Classificação dos Modelos**

De acordo com Tucci (1998), os modelos podem ser assim classificados:

a) Concentrado ou Distribuído: um modelo é dito concentrado quando não leva em consideração a variabilidade espacial e/ou temporal da bacia. Já o modelo é considerado distribuído quando suas variáveis e parâmetros dependem do espaço e/ou tempo;

b) Estocástico ou Determinístico: Os modelos estocásticos são aqueles quando uma das variáveis envolvidas na modelagem tem um comportamento aleatório, possuindo distribuição de probabilidade. Já os modelos determinísticos reproduzem respostas idênticas para o mesmo conjunto de entradas. Mesmo quando uma variável de entrada tiver caráter aleatório, ainda assim o modelo pode ser determinístico, se para cada valor de entrada tiver um único valor de saída (SILVA, 2005).

Segundo Beven (1989), os modelos, após a calibragem, permitem explorar as implicações de fazer certas hipóteses sobre mudanças no sistema real, e prever as alternativas nas respostas do sistema que poderiam ocorrer. Para que um modelo seja utilizado adequadamente, faz-se necessário a compreensão de sua estrutura e de suas limitações.

c) Conceitual ou Empírico: os modelos são ditos conceituais quando levam em consideração os conceitos físicos relacionados aos processos hidrológicos. Já os modelos empíricos, são aqueles que utilizam funções que não tenham relação com os

processos físicos envolvidos e são baseados em análises estatísticas, como métodos de correlação e análise de regressão.

A modelagem hidrológica também permite verificar a consistência das informações disponíveis, que em muitos casos são curtas, obtidas a partir das observações hidrológicas nas bacias. Em geral, os modelos hidrológicos tentam gerar o hidrograma do escoamento superficial a partir dos dados hidro-climatológicos e características físicas da bacia. Os modelos hidrossedimentológicos, porém, tentam gerar além dos hidrogramas, o sedigrama ou a quantidade de produção de sedimentos produzida na bacia.

A modelagem do escoamento superficial em bacias hidrográficas é baseada na resolução de equações diferenciais parciais que descrevem o fluxo e a profundidade do nível de água como funções do tempo e do espaço. Estas equações são conhecidas como equações de Saint-Venant, as quais são formadas pela equação da continuidade e pela equação de quantidade de movimento (CHOW et al., 1988).

Quando na modelagem do escoamento superficial consideram-se todos os termos da equação da quantidade de movimento, o modelo é classificado como hidrodinâmico. Quando os termos que representam as acelerações do fluido são desprezados, o modelo é dito de difusão. Os modelos são classificados como cinemáticos quando são desprezados os termos que representam as acelerações do fluido e a pressão, ou seja, assumem que a declividade da linha de energia é igual à declividade do fundo do canal, sendo assim, as forças devido ao cisalhamento no fluido e devido ao peso do fluido estão equilibradas (LOPES, 2003).

Atualmente existem diversas ferramentas para a modelagem do processo de erosão do solo, cada uma tendo sido desenvolvida em condições específicas de fluxo e de características dos sedimentos. As taxas de erosão calculadas utilizando essas diferentes fórmulas para prever a produção de sedimentos variam significativamente. Logo, a escolha correta de uma dessas fórmulas para prever a produção de sedimentos é uma tarefa laboriosa (ALONSO et al., 1981).

Os modelos conceituais podem ser subclassificados em semiconceituais e físicos. Os semiconceituais estão relacionados às características do processo, embora mantenham um razoável empirismo nos parâmetros das equações envolvidas, enquanto que os modelos físicos utilizam as principais equações diferenciais do sistema físico, para representar os processos e os seus parâmetros são aqueles que mais se aproximam da física do sistema.

O processo de erosão é bastante complexo de ser modelado e depende de três fatores básicos: topografia, natureza do fluxo, e características dos solos e dos sedimentos que o compõe. A combinação destas três características torna a erosão um processo extremamente complexo para ser modelado, em contraste com o processo físico de escoamento. Além destes fatos, a modelagem do processo erosivo é dependente da resposta do modelo hidrológico, o que aumenta e muito o grau de complexidade do processo erosivo.

Figueiredo (1998) cita as vantagens dos modelos de erosão de base física sobre os outros existentes (empíricos e semiconceituais) como sendo: a técnica de modelagem é baseada na física dos processos, os parâmetros possuem significado físico, a bacia é considerada um sistema espacialmente variável com entradas variáveis e parâmetros mensuráveis, possibilidade da extrapolação para áreas hidrologicamente homogêneas

não observadas, aplicabilidade onde existem variações na topografia, uso de solo, cobertura vegetal e clima, consideração de áreas mais complexas, e melhor precisão na modelagem dos eventos individuais.

Visto que os modelos de base física requerem maiores informações a respeito da bacia, o requisito básico para aplicação dos mesmos seria colher todos os dados necessários para uma boa representação dos processos envolvidos. Esta prática demandaria tempo e recursos, pois é necessária a coleta de informação em vários locais da bacia. Para contornar este problema, costuma-se coletar os dados imprescindíveis ao uso do modelo e estimar algumas outras variáveis (parâmetros), de acordo com trabalhos disponíveis na literatura.

Para os parâmetros que não tiveram seus valores coletados ou estimados deve-se efetuar a calibração de acordo com dados observados em ensaios de campo e/ou análises em laboratórios.

As equações básicas para representar os processos hidrológicos são as leis básicas da física tais como o princípio da conservação da massa, energia e quantidade de movimento (equações de Saint Venant). No passado, a impossibilidade de representar o comportamento dos processos como eles ocorriam na prática, como também a limitação em termos computacionais de calcular, em três dimensões, a variabilidade do sistema eram alguns dos fatores que limitavam o desenvolvimento dos modelos distribuídos de base física. Porém, com o advento de novas tecnologias computacionais, as limitações computacionais são quase inexistentes, logo, esses modelos se tornaram cada vez mais utilizados.

O significado físico dos parâmetros permite analisar a variação do comportamento do sistema devido à variação em algum componente do mesmo. Vários modelos de base física, que calculam a erosão e o transporte de sedimentos, foram desenvolvidos ao longo das últimas décadas. A seguir, serão citados, alguns modelos de base física, dentre eles, o modelo Kineros2, utilizado na presente pesquisa:

- **O Modelo CSU** - utiliza um sistema de canais e planos para discretizar a bacia. Calcula a erosão e o transporte de sedimentos separadamente para o fluxo superficial e nos canais, e propaga o fluxo através de um modelo de onda cinemática. O modelo pode representar grandes e pequenas áreas. Alguns parâmetros devem ser calibrados. Serão produzidas distorções nos resultados caso a representação da bacia não seja adequada (FOSTER, 1982). É, talvez, o primeiro modelo de erosão distribuído e de base física.

- **O Modelo KINEROS** (*Kinematic Runoff Erosion Model*) foi proposto por Woolhiser et al. (1990), que incorporaram ao modelo hidrológico de Rovey et al. (1977) componentes de erosão, transporte e deposição. O Kineros é um modelo de eventos distribuído, não linear, onde a bacia é representada por planos retangulares, canais e elementos de armazenamento. O modelo utiliza a equação da continuidade de sedimentos (BENNETT, 1974) e calcula o desprendimento das partículas pelo impacto das gotas de chuva através da equação de Meyer e Wischmeier (1969). Neste, a infiltração é modelada através da equação de Smith-Parlange (SMITH et al., 1993). O modelo Kineros2 é uma versão melhorada do modelo Kineros, e traz como um dos diferenciais a redistribuição da umidade do solo durante a chuva e a capacidade de comportar mais de um pluviógrafo (SMITH et al., 1993).

- **O Modelo WESP** (*Watershed Erosion Simulation Program*) foi proposto por Lopes (1987) e utiliza a componente hidráulica do modelo *kineros* e as técnicas de modelagem desenvolvidas no âmbito do projeto WEPP. Neste modelo, a bacia também é discretizada através de um sistema de planos de escoamento que descarregam em canais de drenagem. É um modelo distribuído, que simula eventos de chuva, e foi elaborado para ser aplicado à pequenas bacias nas regiões semi-áridas. O modelo só considera perda de água por infiltração, não sendo considerada a evaporação. O excesso de infiltração é dado pela equação de Green & Ampt (1911), com tempo de empoçamento calculado para uma chuva não permanente (CHU, 1978). A simplificação pela onda cinemática foi empregada para a equação da quantidade de movimento. O modelo considera erosão por impacto das gotas de chuva e pelo fluxo superficial. Estes processos são considerados não permanentes e variados e são descritos dinamicamente utilizando taxas de erosão e deposição, simultaneamente, ao invés da abordagem convencional onde são utilizadas funções de transporte de sedimentos para fluxo permanente.

- **O Modelo WEPP** (*Water Erosion Prediction Project*) (FLANAGAN & NEARING, 1995) é um modelo desenvolvido pelo Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA) para ser aplicado a grandes bacias. Esse modelo é conceitual, e considera a física do solo, a ciência das plantas e a mecânica da erosão. Ele inclui componentes para planos, canais e para irrigação. A infiltração é baseada na equação de Green & Ampt e o escoamento nos canais é tratado através da modificação da componente de escoamento concentrado do modelo CREAMS (KNISE & CREAMS, 1980). A bacia também é representada por planos e canais.

- **O Modelo SHE** (*Système Hydrologique Européen*) foi desenvolvido por um consórcio europeu de institutos de hidrologia (BATHURST, 1986; BATHURST et al., 1995) e consiste de um modelo distribuído, de base física e cujas equações físicas são resolvidas através de um esquema de diferenças finitas. A bacia é discretizada através de uma grade horizontal e vertical. A sua versão melhorada, **SHETRAN**, considera os processos de erosão, transporte e deposição de sedimento e poluentes. Devido à sua concepção, o modelo requer um grande número de informações e uma estrutura computacional onerosa, o que inviabiliza a sua utilização em nível pessoal.

- **O Modelo SWAT.** - O modelo SWAT – **Soil Water Assessment Tool**, desenvolvido por Plus et al. (2003), simula o escoamento superficial, caudal em linhas de água e transporte de sedimentos e nutrientes. É um modelo de simulação contínua no tempo e cujas variáveis de caracterização hidrológica são distribuídas no espaço. Os dados climáticos necessários para a aplicação do modelo SWAT podem ser dados reais (observados) ou gerados por uma rotina de cálculo (WXGEN), desenvolvida por Plus et al. (2003). A rotina de cálculo que gera os dados climatológicos é também usada para preenchimento de falhas nos dados registrados. A predição do escoamento é realizada com o método do SCS, enquanto a predição da perda do solo com os fatores da MUSLE. A deposição é baseada na tensão de cisalhamento, velocidade de queda e distribuição granulométrica.

### **2.3.2 Utilização de modelos hidrossedimentológicos de base física no semiárido nordestino**

Como referência de trabalhos de modelagem realizados dentro de bacias experimentais no semiárido, pode-se citar diversas pesquisas realizadas na Bacia Experimental de Sumé (BES) e na Bacia Experimental de São João do Cariri. Galvão (1990) aplicou o modelo WESP (Lopes, 1987) às parcelas e microbacias, Santos (1997) aplicou o modelo WESP a uma microbacia desmatada da Bacia Experimental de Sumé e, para otimizar os coeficientes do modelo, utilizou o método *Standardized Powell*. Aragão (2000) utilizou o modelo WESP com uma maior base de dados da BES em parcelas e microbacias. Lopes (2003) utilizou o modelo Kineros2 nas parcelas, microbacias, sub-bacias, e bacia representativa de Sumé e aplicou o modelo WESP às sub-bacias e em toda a Bacia Representativa, complementando o trabalho de Aragão (2000) e comparou os resultados dos dois modelos. Cruz (2004) iniciou os trabalhos de modelagem na bacia experimental de São João do Cariri aplicando o modelo WEPP, às parcelas e microbacias, em uma primeira tentativa de fazer a quantificação do escoamento e da produção de sedimento na região do semiárido nordestino. Todos os trabalhos produziram resultados promissores e demonstraram a necessidade do avanço dos trabalhos nesta temática.

Santos et. al. (2007), utilizando o modelo Kineros2, apresentou os primeiros resultados da estimativa da produção de sedimentos decorrente das chuvas na Bacia Experimental do Jatobá em Pernambuco. No que tange à produção anual de sedimentos na bacia, a Bacia Experimental do Rio Jatobá apresentou produção de sedimentos na bacia da ordem de 3,95 ton/ha/ano, corroborando com os estudos de Araújo (2003) que estimou a erosão do solo em outras Bacias do Semiárido.

Neste contexto, com a evolução da modelagem de erosão, na escala de bacia, essa depende fundamentalmente do entendimento de como se conectam as informações



geradas nas diferentes escalas, ou seja, da microparcela à grande bacia. O entendimento desta questão sem dúvida irá auxiliar também na elaboração de medidas mais efetivas de controle da produção de sedimentos, considerando que os sedimentos não são produzidos somente na bacia vertente, conforme já comentado. Com isso, é importante considerar que as medidas de conservação de solos utilizadas em uma bacia são importantes, porém, não suficientes para reduzir a produção de sedimentos na mesma bacia.

Fatores relacionados com os processos erosivos que ocorrem na calha fluvial também cumprem um papel importante neste processo. Os resultados na escala de parcela têm grande aplicação e importância no suporte de parâmetros para os modelos de base física e distribuídos, já que definem com grande precisão os parâmetros necessários para a caracterização específica de processos interferentes como, por exemplo: a) estudos para determinação da energia cinética da gota de chuva – erosividade, b) salpico, c) formação de selo superficial, d) avaliação de cobertura do solo, e) influência da estabilidade de agregados, coesão do solo, granulometria. Na escala de parcela e vertente, é possível definir taxas de erosão para diferentes solos e níveis de cobertura, em uma condição mais representativa da realidade e com grande controle experimental (MINELLA, 2010).

Ne escala de parcela experimenta é possível realizar uma grande discretização das variáveis de solo e vegetação, permitindo melhor quantificar seus efeitos. Existe também a possibilidade de realizar experimentos com chuva simulada e estabelecer variáveis com erodibilidade e importância da erosão em sulco. Outro aspecto muito importante nesta escala é a possibilidade de compreender a dinâmica da infiltração e escoamento superficial em função de diferentes manejos (MINELLA, 2010).

Paiva (2008) e Santos (2008), estudando o processo erosivo em nível de parcela experimental de erosão, micro-bacia e bacia experimental, observaram bastante influência com relação à escala nos parâmetros responsáveis pelos processos erosivos, tanto em canais quanto em planos de erosão

### **3. MODELO APLICADO NESTA PESQUISA**

Neste trabalho foi utilizado o modelo Kineros2 (**Kinematic Runoff and Erosion Model**), de Woolhiser et al. (1990) (Figura 1).

Este modelo inicialmente incorporou ao modelo hidrológico de Rovey et al. (1977) componentes de erosão, transporte e deposição. Também usou um outro processo de infiltração para simular a vazão, adotado para estudos de vazão rural ou urbanas a partir da chuva de projeto. Desde então, o modelo vem sendo modificado, com inclusão de novos componentes, e.g., simulação da erosão e transporte de sedimentos, revisão do componente de infiltração e inclusão de um elemento de empoçamento; e assim, o modelo foi chamado Kineros. Atualmente, este modelo é chamado Kineros2 que, de acordo com Santos et al. (2001), inclui novas características, tais como: (a) o algoritmo de infiltração abrange o perfil do solo com duas camadas e incorpora um novo método baseado nas características físicas do solo, com a finalidade de redistribuir a água no solo durante os períodos sem chuva; e (b) o solo e os sedimentos são caracterizados por uma distribuição de até cinco classes de tamanho de sedimento. Para a aplicação do modelo serão utilizadas informações referentes aos índices pluviométricos, climatológicos, topográficos, solo e cobertura vegetal da bacia escolhida

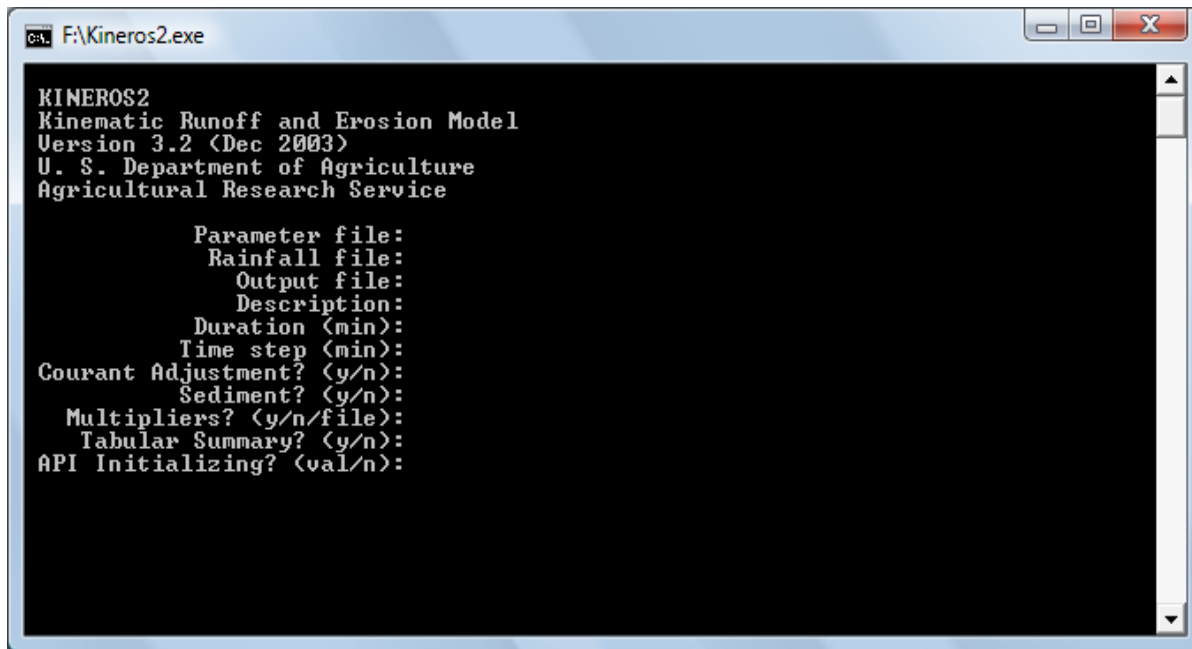


FIGURA 1 - Janela do modelo, Kineros2 (1990).

### 3.1 Cálculo da Infiltração do Solo no Modelo Kineros2

O modelo possui um algoritmo de infiltração que permite uma aproximação física para a redistribuição da água no solo, incluindo a capacidade de recuperação de infiltração durante períodos de estiagens e determinando o percentual de infiltração depois deste período sem chuva. O modelo de infiltração descreve a capacidade de infiltração  $f_c$  como uma função da profundidade infiltrada  $I$ , e necessita de quatro parâmetros básicos para descrever as propriedades de infiltração, que são (a) condutividade hidráulica efetiva saturada do solo  $K_s$  ( $\text{ms}^{-1}$ ); (b) capilaridade integral  $G$  (m); (c) porosidade  $\phi$ ; e (d) índice de distribuição dos tamanhos dos poros  $\lambda$ . Há também

um parâmetro opcional  $C_v$ , o qual descreve a variação aleatória no espaço das propriedades hidráulicas do solo, e uma variável relacionada ao evento denominada de saturação relativa inicial da camada superior do solo  $S_i$ , definida como  $\theta_i/\phi$  na qual  $\theta_i$  é a umidade inicial do solo. O modelo geral para a infiltrabilidade  $f_c$  ( $\text{ms}^{-1}$ ) é dado como uma função da lâmina infiltrada  $I$  (m), por:

$$f_c = K_s \left[ 1 + \frac{\alpha}{e^{\alpha I/B} - 1} \right] \quad (1)$$

Em que  $B = (G + h)(\theta_s - \theta_i)$ , combinando os efeitos do potencial efetivo de capilaridade,  $G$ , profundidade do fluxo,  $h$  (m), e da capacidade de armazenamento de água do solo,  $\Delta\theta = (\theta_s - \theta_i)$  onde  $\theta_s$  é o umidade de saturação do solo ( $\text{m}^3/\text{m}^3$ ). O parâmetro  $\alpha$  representa o tipo de solo,  $\alpha$  se aproxima de zero para areia, e neste caso, a Equação (1) aproxima-se à equação de Green-Ampt;  $\alpha$  aproxima-se de 1 para um solo franco bem uniforme, neste caso a Equação (1) representa a equação de infiltração de Smith-Parlange. A maioria dos tipos de solo é melhor representada por um valor de  $\alpha$  igual a 0,85, sendo este o valor adotado no modelo (CRUZ, 2004).

O valor efetivo do potencial de capilaridade  $G$  é dado pela seguinte expressão:

$$G = \int_{-\infty}^0 \frac{K(\Psi)}{K_s} d\Psi \quad (2)$$

em que  $\Psi$  é o potencial matricial do solo (m) e  $K(\Psi)$  a condutividade hidráulica não-saturada, em função do potencial matricial.

O modelo de infiltração também leva em consideração a recuperação da capacidade de infiltração do solo, a qual ocorre em períodos em que não há

precipitação, ou em períodos em que a precipitação não produz escoamento, geralmente quando a intensidade de precipitação é inferior à permeabilidade do solo. A equação utilizada no modelo para o cálculo da variação da umidade do solo nestes períodos é:

(3)

$$\frac{d\theta_0}{dt} = \frac{\Delta\theta_{i0}}{I} \left[ r - K_i - \left( K(\theta_0) + \frac{\beta p K_s \Delta\theta_{i0} G(\theta_i, \theta_0)}{I} \right) \right]$$

onde  $\Delta\theta_{i0} = \theta_0 - \theta_i$  é a diferença de umidade do solo acima e abaixo da frente de molhamento;  $I$  é a lâmina de infiltração acumulada (m);  $r$  é a taxa de entrada de água na superfície do solo durante a redistribuição de água no solo, a qual pode ser menor do que a permeabilidade  $K_s$ , negativa (devido à evaporação) ou zero;  $p$  é um fator efetivo de profundidade ( $p = 2$  para  $r = 0$ ;  $p = 1,5$  para  $0 < r < K_s$ ;  $p = 3$  para  $r < 0$ );  $G(\theta_i, \theta_0)$  é o valor efetivo do potencial de capilaridade na frente de redistribuição de água (m); e o fator de forma  $\beta$  é dado pela equação:

(4)

$$\beta = \frac{1}{Z(\theta_0 - \theta_i)} \int_0^Z (\theta - \theta_i) dz = 0,85$$

onde  $Z$  é a profundidade da frente de molhamento;

Para calcular a condutividade hidráulica do solo tem-se:

(5)

$$K(\theta) = K \left( \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)^{3+2/\lambda}$$

onde  $\theta$  é a umidade do solo no período de redistribuição de água;  $K_s$  é a permeabilidade efetiva do solo (m/s);  $\theta_r$  é a umidade residual do solo;  $\theta_s$  é a umidade do solo na

saturação;  $\lambda$  é o parâmetro de distribuição do tamanho dos poros. Maiores detalhes sobre o modelo de redistribuição de água no solo, utilizado no modelo Kineros2, podem ser obtidos em LOPES (2002) e CRUZ (2004).

### 3.2 Fluxo nos 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:

(6)

$$Q = ah^m$$

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

A Equação (6) é utilizada juntamente com a equação da continuidade:

(7)

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q(x, t)$$

onde  $t$  é o tempo (s),  $x$  é a distância ao longo do sentido da declividade, e  $q(x, t)$  é a taxa de entrada de escoamento lateral ( $ms^{-1}$ ).

Para a modelagem do fluxo nos planos, a Equação (6) é substituída na Equação (7), onde se obtém:

(8)

$$\frac{\partial h}{\partial t} + amh^{m-1} \frac{\partial h}{\partial x} = q(x,t)$$

As equações de onda cinemática, que são simplificações das equações de Saint-Venant, não preservam todas as suas propriedades, tais como as utilizadas em modelos difusos, os quais consideram os efeitos de jusante sobre o escoamento proveniente de montante, e como nos modelos hidrodinâmicos, onde se consideram as equações de Saint-Venant em sua forma geral, ou seja, incluindo os termos que representam a gravidade, o atrito, à pressão e a inércia do fluxo (PARLANGE et al., 1982).

### 3.3 Fluxo nos canais

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

(9)

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

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:

(10)

$$Q = aR^{m-1}A$$

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*.

### 3.4 Modelagem da erosão nos planos e canais

A equação geral que descreve a dinâmica dos sedimentos dentro do fluxo é a equação de balanço de massa, similar àquela para o fluxo de água (MEYER & WISCHMEIER, 1969):

(11)

$$\frac{\partial(AC_s)}{\partial t} + \frac{\partial(QC_s)}{\partial x} - e(x,t) = q_s(x,t)$$

onde  $C_s$  é a concentração de sedimento no fluxo ( $m^3/m^3$ ),  $Q$  é a vazão hidráulica ( $m^3/s$ ),  $A$  é área da seção transversal do plano ou canal ( $m^2$ ),  $e$  é a taxa de erosão do solo ( $m^2/s$ ) e  $q_s$  é taxa de entrada lateral de sedimento no fluxo nos canais ( $m^3/s/m$ ).

Nos planos, a erosão é modelada como sendo composta por dois componentes principais: a erosão provocada pelo impacto das gotas de chuva no solo, e pela erosão (ou deposição) hidráulica, resultado da interação entre a força de cisalhamento do fluxo e a tendência das partículas de solo no fluxo se depositarem sob efeito da força da gravidade. A erosão resultante é o somatório da taxa da erosão provocada pelo impacto das gotas de chuva  $e_s$  e da erosão hidráulica  $e_h$ :

(12)

$$e = e_s + e_h$$

A erosão por impacto das gotas de chuva é estimada pela seguinte expressão:

(13)

$$e_s = c_f e^{-c_h h} i^2$$

na qual  $i$  é a intensidade da precipitação ( $m/s$ ), o  $c_f$  é um coeficiente a ser determinado experimentalmente ou por calibração, que está relacionado às propriedades do solo e da superfície, e  $e^{-c_h h}$  é um fator que representa a redução na erosão por impacto das gotas



de chuva devido ao aumento da lâmina d'água. O parâmetro  $c_h$  representa a efetividade do amortecimento da superfície da água, fixado no modelo como sendo igual a 656 (SANTOS et al., 2004). A erosão hidráulica ( $e_h$ ) é estimada como sendo linearmente dependente da diferença entre a capacidade de transporte do fluxo (concentração de equilíbrio) e a concentração real de sedimento, e é dada pela equação:

(14)

$$e_h = c_g (C_m - C_s)A$$

onde  $C_m$  é a concentração de equilíbrio na capacidade de transporte,  $C_s = C_s(x,t)$  é a concentração real de sedimentos no fluxo, e  $c_g$  é um coeficiente da taxa de transferência de sedimentos, medido em segundos, e é calculado por:

(15)

$$c_g = c_o \frac{v_s}{h} \text{ se } C_s \leq C_m \text{ (erosão)} \quad \text{ou} \quad c_g = \frac{v_s}{h} \text{ se } C_s > C_m \text{ (deposição)}$$

em que  $c_o$  é um coeficiente que reflete à coesão do solo e  $v_s$  é a velocidade de queda da partícula (m/s).

O modelo utiliza a fórmula de capacidade de transporte de Engelund & Hansen (1967), com a inclusão de um limite crítico do valor da potência unitária do fluxo  $\Omega = uS$  (*unit stream power*), igual a 0,004 m/s, onde  $u$  é a velocidade do fluxo (m/s) e  $S$  é a declividade, para estender a sua aplicabilidade a fluxos rasos. A equação para o cálculo da concentração de sedimentos na capacidade de transporte é a seguinte:

(16)

$$C_m = \frac{0,05}{d(S_s - 1)^2} \sqrt{\frac{Sh}{g}} (\Omega - 0,004)$$

onde  $g$  é a aceleração da gravidade ( $m/s^2$ ),  $S_s$  é a densidade relativa do sedimento, igual a 2,65,  $d$  é o diâmetro do sedimento (m),  $h$  é a profundidade do fluxo (m) e as outras variáveis já foram definidas anteriormente.

A velocidade de queda da partícula é calculada pela seguinte equação:

$$v_s^2 = \frac{4}{3} \frac{g(S_s - 1)d}{C_D} \quad (17)$$

onde  $C_D$  é o coeficiente de arrasto da partícula, que é uma função do número de *Reynolds*, e é calculado pela seguinte expressão:

(18)

$$C_D = \frac{24}{R_n} + \frac{3}{\sqrt{R_n}} + 0,34$$

em que  $R_n$  é o número de Reynolds, calculado como  $R_n = v_s d / \nu$ , e  $\nu$  é a viscosidade cinemática da água. A velocidade de queda da partícula é encontrada resolvendo simultaneamente as equações (17) e (18).

A simulação do transporte de sedimentos para os canais é realizada de maneira semelhante à simulação do transporte de sedimentos nos planos. A principal diferença nas equações é que a erosão por impacto das gotas de chuva é desprezada, e o termo  $q_s$  torna-se importante na representação da entrada de fluxo lateral.

### 3.5 Dados de Entrada do Modelo Kineros2 (1990)

O modelo Kineros2 necessita de informações de entrada para o arquivo de precipitação, como mostrado abaixo (FIGURA 2):

- a) Intensidade da precipitação em mm/h ou altura de chuva – Depth;
- b) Tempo da precipitação em minutos – Time; e

c) Quantidade de eventos de chuva – N.

```

BEGIN RG01 !teste
  N = 42
  TIME      INTENSITY
  !(min)    (mm/h)
    0        0.0
    1        60.0
    5        60.0
   10        60.0
   15        60.0
   20        60.0
   25        60.0
   30        60.0
   35        60.0
   40        60.0
   45        60.0
   50        60.0
   55        60.0
   60        60.0
   65        60.0
   70        60.0
   75        60.0
   80        60.0

END

```

FIGURA 2 - Exemplo de um arquivo de entrada de chuva do modelo Kineros2

### 3.6 Parâmetros de Entrada do Modelo Kineros2

Segundo Silva (2005), os modelos hidrológicos possuem uma estrutura definida e alguns parâmetros que controlam sua operação. Os parâmetros são definidos para cada bacia, com o objetivo de particularizar o modelo na bacia em estudo, para que possa reproduzir de forma satisfatória o comportamento hidrológico da mesma.

Os parâmetros no modelo Kineros2 se dividem em dois tipos:

- Globais, que se referem às características físicas da bacia como um todo, ou seja, são homogêneos para toda bacia,
- Parâmetros distribuídos nos planos e nos canais.

### 3.6.1 Parâmetros Globais

Os parâmetros globais (FIGURA 3) do modelo Kineros2 são:

1. **Units:** sistema de unidades utilizado para todos os parâmetros (métrico ou inglês);
2. **Clen:** comprimento característico, cujo valor é dado pelo comprimento do maior canal ou da maior cascata de planos;
3. **Temperature:** temperatura em graus Celsius ou Fahrenheit;
4. **Diameters:** diâmetros representativos das partículas do solo, em milímetros ou polegadas. Limite máximo de cinco classes de diâmetro;
5. **Densities:** valores das massas específicas dos diâmetros das classes acima determinadas.

```

BEGIN GLOBAL
  CLEN = 3,  UNITS = METRIC
  DIAMS = .005, .05, .25, 0.50 ! mm
  DENSITY = 2.65, 2.60, 2.60, 2.60 ! g/cc
  TEMP = 28 ! deg C
  Nete = 1
END GLOBAL
!-----
BEGIN PLANE
  ID = 1,  LEN = 3.0,  WID = 1.0,  SL = .06,
  MANNING = 0.05
  SPACING = 0.2
  In = 0.0,  Canopy = 0
  THICK = 100,  SAT = 0.26
  KS      G      DIST  POR  ROCK
  4.28   200    0.47  .3   0.03 ! upper layer
  4.28   200    0.47  .3   0.5  ! lower layer
  FRACT = 0.3, 0.2, 0.3, 0.2,  SPLASH = 68,  CO = 0.1

  F1 = Classes
  PR = 2
END PLANE
!-----

```

FIGURA 3 - Exemplo de um arquivo de entrada de parâmetros do modelo Kineros

### 3.6.2 Parâmetros dos Planos

1. **Identifier**: número de identificação do plano;
2. **Upstream**: número de identificação do plano a montante (se houver);
3. **Length**: comprimento (metros ou pés);
4. **Width**: largura (metros ou pés);
5. **Slope**: declividade;
6. **Manning**: coeficiente de rugosidade de Manning;
7. **Chezy**: coeficiente de Chezy;
8. **Relief**: altura média do relevo da microtopografia (milímetros ou polegadas);
9. **Spacing**: distância média do relevo da microtopografia (metros ou pés);
10. **Interception**: interceptação vegetal (milímetros ou polegadas);
11. **Canopy Cover**: fração da superfície ocupada por vegetação;
12. **Saturation**: saturação inicial relativa do solo, razão entre a umidade inicial e porosidade do solo;
13. **Cv**: coeficiente de variação da condutividade hidráulica saturada efetiva;
14. **Ks**: condutividade hidráulica saturada efetiva (mm/h ou polegadas/h);
15. **G**: valor efetivo do potencial de capilaridade (mm ou polegadas);
16. **Distribution** ( $\lambda$ ): índice de distribuição do tamanho dos poros (índice de Brooks e Corey);
17. **Porosity**: porosidade do solo;
18. **Rock**: fração volumétrica de rochas. Se a permeabilidade é estimada com base na textura do solo, ela deve ser multiplicada por “1- Rock”, para considerar esse volume de rochas;
19. **Splash** (*cf*): parâmetro que representa a erosão causada pelo impacto das gotas de chuva;

20. **Cohesion** ( $c_o$ ): coeficiente de coesão do solo;

21. **Fractions**: fração de cada classe de diâmetros representativos do solo.

### 3.6.3 Parâmetros dos Canais

1. **Upstream**: número de identificação do elemento (plano ou canal) a montante;

2. **Lateral**: número de identificação dos planos que contribuem lateralmente para o canal;

3. **Length**: comprimento (metros ou pés);

4. **Width**: largura da base (metros ou pés);

5. **Slope**: declividade;

6. **Manning**: coeficiente de Manning;

7. **Chezy**: coeficiente de Chezy;

8. **SS1, SS2**: declividades laterais;

9. **Saturation**: saturação inicial relativa do solo, razão entre a umidade inicial e porosidade do solo;

10. **Cv**: coeficiente de variação da condutividade hidráulica saturada efetiva;

11. **Ks1**: condutividade hidráulica saturada efetiva na camada superior do solo (mm/h ou polegadas/h);

12. **Ks2**: condutividade hidráulica saturada efetiva na camada inferior do solo (mm/h ou polegadas/h);

13. **G1**: valor efetivo do potencial de capilaridade na camada superior do solo (mm ou polegadas);

14. **G2**: valor efetivo do potencial de capilaridade na camada inferior do solo (mm ou polegadas);

15. **Distribution** ( $\lambda$ ): índice de distribuição do tamanho dos poros (índice de Brooks e Corey);

16. **Porosity**: porosidade do solo;

17. **Rock1**: fração volumétrica de rochas da camada superior. Se a permeabilidade é estimada com base na textura do solo, ela deve ser multiplicada por “1- Rock”, para considerar esse volume de rochas;

18. **Rock2**: fração volumétrica de rochas da camada inferior. Se a permeabilidade é estimada com base na textura do solo, ela deve ser multiplicada por “1- Rock”, para considerar esse volume de rochas;

19. **Cohesion (co)**: coeficiente de coesão do solo;

20. **Fractions**: fração de cada classe de diâmetros representativos do solo.

## 4. MATERIAL E MÉTODOS

### 4.1 Caracterização da área de estudo

Como procedimento metodológico, optou-se pelo método de estudo de caso, tendo como local de pesquisa de campo a Bacia Representativa do Mimoso (BRM), no Município de Pesqueira, no Agreste de Pernambuco (Figura 4), onde estudos hidrológicos e sedimentológicos têm sido desenvolvidos pela Universidade Federal Rural de Pernambuco. Segundo os resultados de Santos et al. (2008) demonstram que as condições do solo e as chuvas típicas da região geram taxas elevadas de produção de sedimentos e níveis preocupantes de degradação dos solos.

O local escolhido para estudo foram as parcelas de erosão contidas na Bacia Representativa do Riacho Mimoso, pertencente ao sistema do Rio Ipanema, em sua porção ocidental mais a montante que é uma das sub-bacias investigadas pela Rede de Hidrologia do Semiárido (REHISA). Abrange parte dos municípios de Arcoverde e de Pesqueira, do Estado de Pernambuco, numa área de 194,82 km<sup>2</sup>. Localiza-se entre 8° 34' 17 e 8° 18' 11" de Latitude Sul, e 37° 1' 35" e 36° 47' 20" de Longitude Oeste. Ao Norte faz limite com a bacia do Rio Ipojuca, e ao Oeste com a bacia do Rio Moxotó.

A região exibe clima semi-árido muito quente tipo Estepe, segundo Köeppen. A precipitação média anual na região é de 730 mm, a temperatura média é de 23 C<sup>0</sup> e a evapotranspiração é de cerca de 1683 mm (MONTENEGRO & MONTENEGRO, 2006). A vegetação predominante é a caatinga hipoxerófila, cactáceas e bromeliáceas. Os principais solos presentes são Neossolos, Planossolo, Argissolos e Luvisolos (MONTENEGRO et al., 2004).



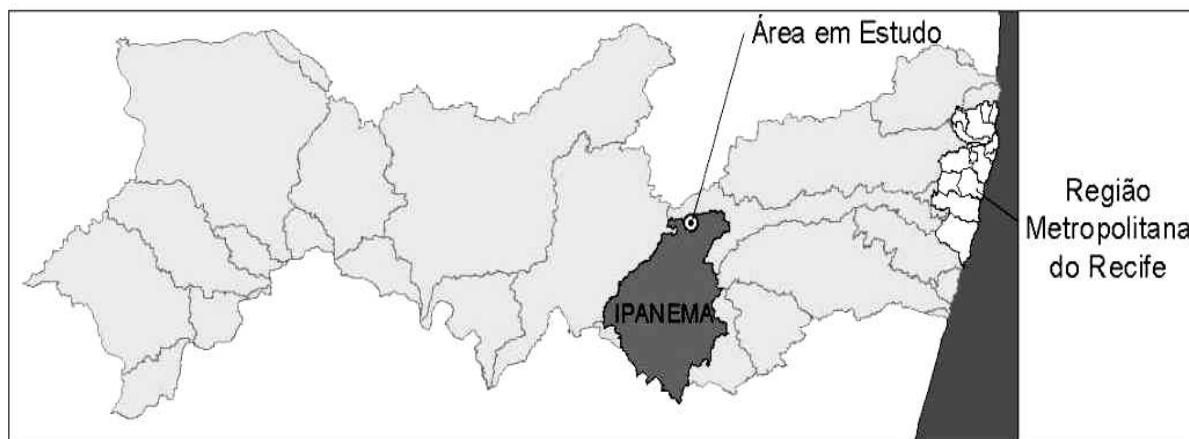


FIGURA 4 - Localização a nível de bacia hidrográfica da área de estudo.  
Fonte: Montenegro et al. (2003)

O solo do local de estudo foi classificado como predominantemente Neossolo Flúvico, constituindo um depósito heterogêneo com teores de silte variando de médio a alto. Nas encostas circundantes encontram-se solos do tipo Neossolos Litólico e Regolítico e Argissolos, com presença de impedimento (RIBEIRO & CORRÊA, 2001). As Características físicas e químicas foram determinadas segundo metodologia da EMBRAPA (1997) e encontra-se descrita na Tabela 1.

**Tabela 1. Características físicas do solo na área experimental.**

Composição granulométrica			Características químicas							CO	
(% )			pH	P	K	Ca	Mg	Na	Al	(H+Al)	g.k <sup>-1</sup>
Areia	Silte	Argila	(H <sub>2</sub> O)	mg.dm <sup>-3</sup>							
					cmolc.dm <sup>-3</sup>						
63	15	22	5,6	2,75	0,12	1,98	0,33	0,06	0,07	0	7,93

Fonte: Santos, 2006.

#### 4.2 Parcelas de Erosão

Na área em estudo há 18 parcelas experimentais, sendo cada parcela com 1 x 3 m, com a maior dimensão no sentido do declive, construídas com chapas metálicas de 20 cm de altura, sendo aproximadamente 10 cm cravados no solo, as quais possuíam na parte inferior uma calha para coleta da enxurrada. Nas parcelas foram aplicados os seguintes tratamentos de manejo do solo: feijoeiro em nível (NB1) com barramentos de pedra entre cada fileira de plantio do feijoeiro, no espaçamento de 0,5 m; feijoeiro cultivado em nível (NB2) com barramentos de pedra no espaçamento 1,0 m; feijoeiro cultivado morro abaixo (MA); feijoeiro em nível com cobertura morta (CM), onde a cobertura utilizada foi palha de feijão; desmatada (D) e cobertura natural (CN), conforme Figura 5 (SANTOS, 2006).

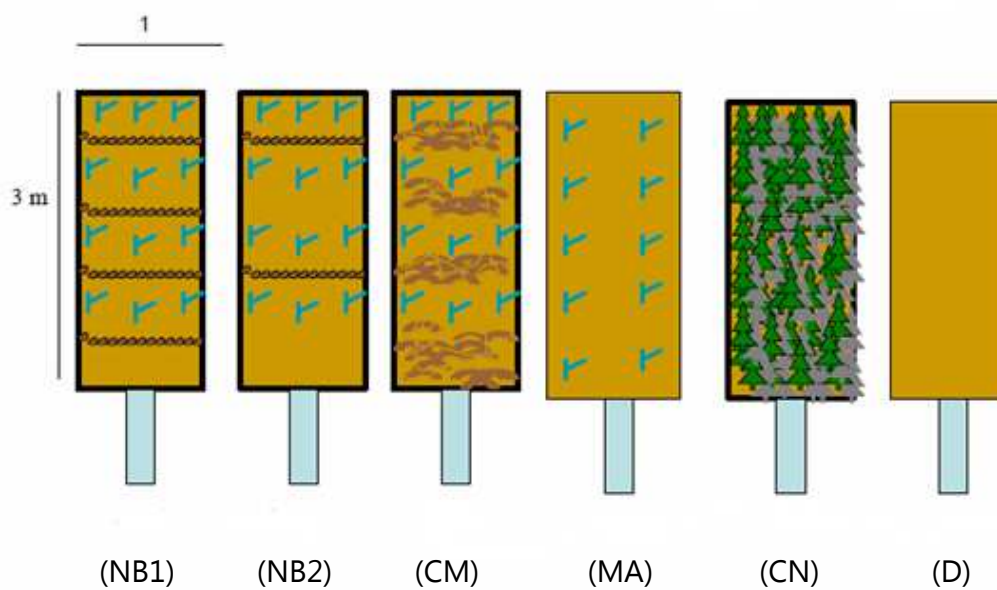


FIGURA 5 - Esquema experimental dos tratamentos. Fonte: Santos, 2006.

#### 4.2.1 Dados coletados nas parcelas de erosão

Para realização deste trabalho, foram utilizados os dados produção de sedimentos e escoamento superficial, além de características físicas de solo, coletados por Santos (2006), durante os meses de abril a outubro de 2006 em parcelas de erosão localizadas na BRM.

Cada parcela experimental recebeu um total de três chuvas simuladas. A primeira foi realizada vinte dias após a sementeira, e a partir daí em intervalos regulares de 30 dias durante o ciclo do feijoeiro, correspondendo às seguintes fases fenológicas da cultura: crescimento, floração e o período de vagens, resultando em 42 testes de chuva simulada (para os tratamentos NB1, NB2, CM, MA, CN e D), sendo cada tratamento repetido três vezes (SANTOS, 2006).

As chuvas tiveram intensidades constantes de  $60 \text{ mm.h}^{-1}$ . A precipitação teve duração de 80 minutos, utilizando-se um simulador de chuvas pendular, o qual foi desenvolvido para atuar em parcelas experimentais no campo, sendo de fácil locomoção e constituído por uma armação retangular apoiada sob quatro pés tubulares de aço removíveis. A intensidade gerada no experimento é típica de regiões semiáridas durante eventos críticos, capazes de gerar relevantes processos erosivos (SANTOS, 2006).

Antes da aplicação de cada chuva simulada, foram determinadas as porcentagens de cobertura do solo pelos resíduos vegetais e pelas copas das plantas, a porcentagem de cobertura do solo foi determinada através do método de Mannering, descrito por Bezerra et al. (2002), que utiliza a projeção fotográfica de uma moldura com a cobertura vegetal da área. Inicialmente construiu-se uma moldura de madeira nas dimensões de 76cm de largura por 51 cm de comprimento, a qual foi então, montada sobre uma área representativa das parcelas. Em seguida, fotografou-se o solo, enquadrando-se a moldura no visor da câmara digital. Posteriormente, projetaram-se as molduras fotografadas em um quadro padrão. Com a soma da contagem das interseções, com os pontos de cobertura vegetal da superfície (copa/ resíduo) projetados, tem-se a porcentagem total de cobertura vegetal, sendo que cada ponto de interseção representa 2%. O método possui 50 pontos de intersecção. Também se avaliava a umidade do solo

na camada de 0 a 20 cm de profundidade, através de coletas de solo, onde as amostras eram levadas a laboratório para determinação através do método gravimétrico (SANTOS, 2006).

O tempo de início do teste era registrado, para assim se controlar o intervalo de tempo entre o início da chuva e o início do escoamento para cada tratamento. A partir do início do escoamento, era feita a primeira coleta de enxurrada, na calha coletora da parcela experimental; a partir de então as próximas eram realizadas em intervalos regulares de 5 minutos, com duração de 10 segundos. As coletas eram realizadas em proveta graduada de 1000 ml, onde era lido o volume da enxurrada; logo após este material era armazenado em potes plásticos com capacidade de 1000 ml (SANTOS, 2006).

Utilizando o Método de Mannering, descrito por Bezerra & Cantalice (2006), os índices de área foliar IAF para cada repetição foram avaliados. A partir dos valores obtidos para IAF, estimou-se a máxima interceptação da cobertura vegetal, com base da Equação de Ehlers (1989), expressa como:

(19)

$$ICV \text{ (mm)} = 0,932 + 0,499 \text{ IAF} + 0,0057 \text{ IAF}^2$$

O equacionamento utilizado foi o mesmo adotado por Pruski et al. (2001), para determinação da interceptação máxima da cobertura vegetal.

**Tabela 2. Dados coletados nas parcelas de erosão em função da fase de desenvolvimento do feijão**

EVENTO	FASE DESENVOLVIMENTO	PRECIPITAÇÃO	INTENSIDADE	Lo (mm)	Eo (Kg/ha)
		(mm)	(mm.h <sup>-1</sup> )		
D1	–	80,00	60,00	43,00	1433,33
D2	–	80,00	60,00	62,50	933,33
D3	–	80,00	60,00	64,85	1433,33
CN 1	–	80,00	60,00	0,77	0,00
CN 2	–	80,00	60,00	0,59	21,00
CN 3	–	80,00	60,00	0,55	9,67
MA 11	CRESCIMENTO	80,00	60,00	33,23	733,33
MA 12	FLORESCIMENTO	80,00	60,00	63,11	1000,00
MA 13	VAGENS	80,00	60,00	31,61	566,67
MA 21	CRESCIMENTO	80,00	60,00	63,80	433,33
MA 22	FLORESCIMENTO	80,00	60,00	40,40	666,67
MA 23	VAGENS	80,00	60,00	74,75	866,67
MA 31	CRESCIMENTO	80,00	60,00	37,35	400,00
MA 32	FLORESCIMENTO	80,00	60,00	47,78	533,33
MA 33	VAGENS	80,00	60,00	64,35	933,33
CM 11	CRESCIMENTO	80,00	60,00	33,23	200,00
CM 12	FLORESCIMENTO	80,00	60,00	63,11	100,00
CM 13	VAGENS	80,00	60,00	31,61	0,00
CM 21	CRESCIMENTO	80,00	60,00	63,80	33,33
CM 22	FLORESCIMENTO	80,00	60,00	40,40	66,67
CM 23	VAGENS	80,00	60,00	74,75	33,33
CM 31	CRESCIMENTO	80,00	60,00	37,35	33,33
CM 32	FLORESCIMENTO	80,00	60,00	47,78	33,33
CM 33	VAGENS	80,00	60,00	64,35	0,00

**Continuação Tabela 2. Dados coletados nas parcelas de erosão em função da fase de desenvolvimento do feijão.**

EVENTO	FASE DESENVOLVIMENTO	PRECIPITAÇÃO	INTENSIDADE	Lo (mm)	Eo (Kg/ha)
		(mm)	(mm.h <sup>-1</sup> )		
NB1 11	CRESCIMENTO	80,00	60,00	27,31	200,00
NB1 12	FLORESCIMENTO	80,00	60,00	28,66	100,00
NB1 13	VAGENS	80,00	60,00	24,40	0,00
NB1 21	CRESCIMENTO	80,00	60,00	62,30	33,33
NB1 22	FLORESCIMENTO	80,00	60,00	61,75	66,67
NB1 23	VAGENS	80,00	60,00	67,55	33,33
NB1 31	CRESCIMENTO	80,00	60,00	52,46	33,33
NB1 32	FLORESCIMENTO	80,00	60,00	0,19	33,33
NB1 33	VAGENS	80,00	60,00	52,43	0,00
NB2 11	CRESCIMENTO	80,00	60,00	20,60	766,67
NB2 12	FLORESCIMENTO	80,00	60,00	20,80	233,33
NB2 13	VAGENS	80,00	60,00	25,15	666,67
NB2 21	CRESCIMENTO	80,00	60,00	33,51	833,33
NB2 22	FLORESCIMENTO	80,00	60,00	35,56	333,33
NB2 23	VAGENS	80,00	60,00	40,03	400,00
NB2 31	CRESCIMENTO	80,00	60,00	36,31	933,33
NB2 32	FLORESCIMENTO	80,00	60,00	29,50	300,00
NB2 33	VAGENS	80,00	60,00	37,18	866,67

**FONTE: Santos, 2006**

#### **4.3 Determinação dos parâmetros do modelo Kineros2 (1990)**

Os parâmetros do modelo foram estabelecidos de acordo com as características de cada parcela, ou seja, de acordo com as características físicas do solo, cobertura vegetal, declividade, etc. A seguir são apresentados todos os parâmetros utilizados para modelar o escoamento superficial e erosão do solo nas parcelas da Bacia Representativa do Mimoso.

Nesta pesquisa o modelo Kineros2 utiliza um conjunto de parâmetros de entrada que podem ser agrupados em três grandes grupos:

a) parâmetros que podem ser determinados com base nas informações disponíveis na literatura ou com base em trabalhos efetuados na bacia em estudo ou em áreas semelhantes: relief, spacing;

b) parâmetros cujos valores podem ser medidos experimentalmente em campo ou no laboratório, ou ainda de acordo com as características geométricas dos elementos: *Clen*, *Diameters*, *Densities*, *Upstream*, *Length*, *Width*, *Slope*, *Canopy Cover*, *Cv*; *G*, *Porosity*, *Distribution*, *Manning*, *Ks*;

c) parâmetros cujos valores devem ser determinados pela calibração do modelo: *cf*, *co*, *G*.

Nesta pesquisa, os parâmetros do modelo Kineros2 para predição do escoamento superficial utilizados para a modelagem nas parcelas foram:

**a) Tamanho característico dos sedimentos (*d*):** Existem vários critérios para a escolha do diâmetro representativo de misturas de sedimentos. O  $d_{50}$  consiste no diâmetro de sedimento tal que 50% da amostra tem diâmetro inferior. O valor desse parâmetro foi determinado com base na distribuição granulométrica de algumas amostras coletadas em campo por Santos (2006), resultando em quatro classes de diâmetros, 0,005; 0,05; 0,25 e 0,50 mm.

**b) Densidade relativa dos sedimentos ( $S_s$ ):** baseado nas amostras de Santos (2006), foram obtidos os respectivos valores, 2,65; 2,60; 2,60 e 2,60  $\text{g.cm}^{-3}$ .

**c) Temperatura da água:** considerada como sendo igual a 25° C, temperatura média normalmente encontrada na BRM.

**d) Condutividade hidráulica saturada efetiva ( $K_s$ ):** de acordo com os estudos de Rawls et al. (1991), o valor efetivo da condutividade hidráulica saturada que deve ser utilizada em Modelos de infiltração como o de Green & Ampt (1911) e Smith & Parlange (1978), deve ser a metade do valor da condutividade hidráulica saturada, devido ao ar aprisionado nos vazios do solo, fenômeno que normalmente ocorre em situações reais em campo. Cadier & Freitas (1982), Audry et al. (1987) e Molinier et al.



(1989) efetuaram algumas medições e encontraram valores entre 0,5 mm/h e 26 mm/h. No entanto, neste trabalho assumiu-se o valor de  $K_s$  para ambas as camadas do solo, como sendo iguais aos valores fornecidos por Santos (2006), obtidos através do método do balanço hídrico aplicados para cada parcela de erosão do presente trabalho.

**e) Declividade média das parcelas (Slope):** foram determinadas a partir de levantamentos topográficos, obtendo-se um valor médio para as parcelas de 6% de declividade.

**f) Porosidade ( $\phi$ ) e índice de distribuição dos tamanhos dos poros ( $\lambda$ ):** Estes parâmetros variam de acordo com o tipo de solo, e foram determinados a partir dos trabalhos de Santos (2006) e pela equação de Brooks & Corey (1964). Sendo fixados em  $\phi = 0,30$  e  $\lambda = 0,47$ .

**g) Valor efetivo do potencial de capilaridade ( $G$ ):** De acordo com estes dados e baseado no trabalho de Rawls & Saxton (1982), o parâmetro  $G$ , foi atribuído, inicialmente, com o seguinte valor:  $G = 263$  mm. Os valores recomendados por Rawls & Saxton (1982) são apenas indicações baseadas no tipo do solo e não necessariamente correspondem às características do solo da BRM. Uma vez que os valores de  $G$  influenciam bastante a resposta do modelo, foi efetuada uma análise de sensibilidade para determinar os limites práticos deste parâmetro e, por consequência, os valores mais adequados para a região da BRM.

Nesta pesquisa, os parâmetros do modelo Kineros2 para predição da produção de sedimentos, utilizados para a modelagem nas parcelas foram:

**a) Tamanho característico dos sedimentos ( $d$ ):** Existem vários critérios para a escolha do diâmetro representativo de misturas de sedimentos. O  $d_{50}$  consiste no diâmetro de sedimento tal que 50% da amostra têm diâmetro inferior. O valor desse parâmetro foi determinado com base na distribuição granulométrica de algumas amostras coletadas em campo por Santos (2006), resultando em quatro classes de diâmetros: 0,005; 0,05; 0,25 e 0,50 mm.

**b) Densidade relativa dos sedimentos ( $S_s$ ):** baseado nas amostras de Santos (2006), foram obtidos os respectivos valores: 2,65; 2,60; 2,60 e 2,60  $\text{g.cm}^{-3}$ .

**c) Parâmetro relacionado à coesão do solo ( $co$ ) e o Splash ( $cf$ ):** o primeiro parâmetro ( $co$ ) influencia o cálculo da erosão por arrasto devido ao fluxo superficial. Foi feita uma análise de sensibilidade deste parâmetro, e a produção de sedimentos mostrou-se praticamente insensível à sua variação. Dessa forma, o parâmetro  $co$  pode ser assumido como qualquer valor entre 0 e 1, sendo adotado neste trabalho  $co$  igual a 0,01 para as parcelas, valor este igual ao utilizado por Santos et al. (2007) para experimento realizado na Bacia Experimental do Jatobá, que assim como a BRM, está contida na Bacia do Alto Ipanema. Para obtenção do parâmetro de erosão  $cf$  para os planos, foi realizado a calibração, utilizando para este fim os eventos de chuva simulada com seus respectivos dados de produção de sedimentos observados. Segundo Leprun (1981), as chuvas na região do semiárido nordestino são de curta duração, mas medianamente

intensas, o que é fato comum para outras regiões semiáridas (LOPES & CANFIELD, 2004). Sendo assim, o agente desagregador seria o impacto de gotas de chuvas, já que o escoamento superficial nas vertentes é muito raso e não possui energia suficiente para desagregar grandes cargas de material, servindo somente para o transporte do material desagregado pela chuva. Lopes (2003) mostrou que a erosão causada pelo fluxo superficial tinha um efeito secundário, se comparado ao efeito da erosão por impacto. Isto foi refletido nos valores dos parâmetros calibrados por ele, nas micro-bacias de Sumé, sendo o parâmetro  $co$  fixado em 0,01 e o  $cf$  calibrado evento a evento.

Recapitulando a metodologia deste trabalho, primeiramente calibraram-se os parâmetros da vazão, com os parâmetros de distribuição de água no solo  $G$  (capilaridade), em seguida, calibraram-se os parâmetros de erosão, Cohesion ( $co$ ) e Splash ( $cf$ ). Em cada tratamento e em cada repetição, foram utilizados os dados obtidos por Santos (2006) para os seguintes parâmetros: Saturação inicial, condutividade do solo, Manning, porosidade, cobertura vegetal (%), Rocha (Tabela 4).

Os parâmetros  $G$  e  $cf$  foram calibrados evento a evento, comparando os valores observados com os calculados de lâmina e erosão, além do coeficiente de Nash-Sutcliffe (1970), a fim de se verificar se a simulação seria considerada como satisfatória ou não.

Com relação ao método de tentativa e erro, a calibração dos parâmetros, se dava pelo o ajuste do valor total de volume escoado observados ( $Lo$ ) se igualasse ao volume escoado calculados ( $Lc$ ) e total de sedimentos observados ( $Eo$ ) se igualasse ao total de sedimentos calculados ( $Ec$ ), sendo este procedimento repetido para cada evento. De maneira que a razão entre  $Lo/Lc$  e  $Eo/Ec$ , se igualasse a um 1 ou próximo deste valor.

Foi realizada ainda a calibração, a partir da utilização do coeficiente de determinação de Nash-Sutcliffe (1970), que possibilitou um ajuste razoável para os

hidrogramas. O Coeficiente de Eficiência de Nash e Sutcliffe, dado pela equação 20, é um dos mais importantes critérios estatísticos para avaliar a precisão de modelos hidrológicos (MACHADO et al. 2003).

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^m (Q_{obs(i)} - Q_{est(i)})^2}{\sum_{i=1}^m (Q_{est(i)} - \bar{Q})^2} \quad (20)$$

sendo:  $Q_{obs(i)}$  – vazão observada;  $Q_{est(i)}$  - vazão estimada pelo modelo,  $\bar{Q}$  – vazão média observada;  $m$  – número de dados no evento considerado.

O coeficiente  $R^2$  pode variar a partir de negativo infinito até 1, sendo 1 um ajuste perfeito. O valor de  $R^2$  é fortemente influenciado por erros nas vazões máximas, razão porque, quando  $R^2$  é próximo de 1, o modelo está produzindo bom ajuste para os eventos de escoamento superficial. O desempenho de um modelo é considerado adequado e bom se o valor de  $R^2$  supera 0,75, e é considerado aceitável se o valor de  $R^2$  fica entre 0,36 e 0,75 (COLLISCHONN, 2001).

## 5. RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados os resultados da modelagem do escoamento e transporte de sedimentos para os quarenta e dois eventos adotados, com suas respectivas lâminas escoadas e totais de sedimentos produzidos em cada parcela, além dos parâmetros obtidos usados pelo modelo para simulação.

Os parâmetros não calibrados dos modelos foram estabelecidos de acordo com as características de cada parcela, ou seja, segundo o tipo de solo, cobertura vegetal, declividade, etc. Os valores para cada tratamento podem ser visualizados na Tabela 3.

A Tabela 4 mostra os valores dos parâmetros  $G$  e o parâmetro  $cf$  obtidos para todos os eventos de calibração para as parcelas de erosão nas diferentes fases de desenvolvimento da cultura do feijoeiro na BRM, bem como os valores observados e calculados do escoamento superficial e da produção de sedimentos.

**Tabela. 3 Parâmetros Físicos do Solo do Modelo Kineros2 Não Calibrados**

EVENTO	Slope	Manning	Interception	Canopy Cover	Saturation	Ks1 e Ks2		Dist	Thick	Spacing	Rock 1	Rock 2
						(mm/h)	Porosity					
D1	0,06	0,05	0,00	0,00	0,12	6,28	0,30	0,47	100,00	0,20	0,03	0,50
D2	0,06	0,05	0,00	0,00	0,12	6,28	0,30	0,47	100,00	0,20	0,03	0,50
D3	0,06	0,05	0,00	0,00	0,09	6,28	0,30	0,47	100,00	0,20	0,03	0,50
CN 1	0,06	0,41	1,43	1,00	0,29	55,00	0,30	0,47	100,00	0,20	0,03	0,50
CN 2	0,06	0,41	1,43	1,00	0,32	55,00	0,30	0,47	100,00	0,20	0,03	0,50
CN 3	0,06	0,41	1,43	1,00	0,32	55,00	0,30	0,47	100,00	0,20	0,03	0,50
MA 11	0,06	0,06	1,04	0,22	0,16	14,39	0,30	0,47	100,00	0,20	0,03	0,50
MA 12	0,06	0,06	1,04	0,22	0,16	7,00	0,30	0,47	100,00	0,20	0,03	0,50
MA 13	0,06	0,04	1,04	0,22	0,16	14,39	0,30	0,47	100,00	0,20	0,03	0,50
MA 21	0,06	0,04	1,08	0,30	0,14	10,41	0,30	0,47	100,00	0,20	0,03	0,50
MA 22	0,06	0,04	1,08	0,30	0,14	10,41	0,30	0,47	100,00	0,20	0,03	0,50
MA 23	0,06	0,04	1,08	0,30	0,14	5,00	0,30	0,47	100,00	0,20	0,03	0,50
MA 31	0,06	0,06	1,08	0,30	0,16	9,66	0,30	0,47	100,00	0,20	0,03	0,50
MA 32	0,06	0,06	1,08	0,30	0,16	9,66	0,30	0,47	100,00	0,20	0,03	0,50
MA 33	0,06	0,06	1,08	0,30	0,16	9,66	0,30	0,47	100,00	0,20	0,03	0,50
CM 11	0,06	0,41	1,36	0,86	0,37	50,00	0,30	0,47	100,00	0,20	0,03	0,50
CM 12	0,06	0,41	1,36	0,86	0,37	55,84	0,30	0,47	100,00	0,20	0,03	0,50
CM 13	0,06	0,41	1,36	0,86	0,37	59,05	0,30	0,47	100,00	0,20	0,03	0,50
CM 21	0,06	0,41	1,41	0,97	0,30	39,00	0,30	0,47	100,00	0,20	0,03	0,50
CM 22	0,06	0,41	1,41	0,97	0,30	42,25	0,30	0,47	100,00	0,20	0,03	0,50
CM 23	0,06	0,41	1,41	0,97	0,30	44,36	0,30	0,47	100,00	0,20	0,03	0,50
CM 31	0,06	0,41	1,41	0,97	0,29	45,25	0,30	0,47	100,00	0,20	0,03	0,50
CM 32	0,06	0,41	1,41	0,97	0,29	45,25	0,30	0,47	100,00	0,20	0,03	0,50
CM 33	0,06	0,41	1,41	0,97	0,29	36,01	0,30	0,47	100,00	0,20	0,03	0,50

**Continuação Tabela. 3 Parâmetros Físicos do Solo do Modelo Kinos2 Não Calibrados**

EVENTO	Slope	Manning	Interception	Canopy Cover	Saturation	Ks1 e Ks2		Dist	Thick	Spacing	Rock 1	Rock 2
						(mm/h)	Porosity					
NB1 11	0,06	0,15	1,10	0,35	0,23	19,09	0,33	0,47	100,00	0,20	0,03	0,50
NB1 12	0,06	0,15	1,10	0,35	0,23	18,50	0,33	0,47	100,00	0,20	0,03	0,50
NB1 13	0,06	0,15	1,10	0,35	0,23	20,00	0,33	0,47	100,00	0,20	0,03	0,50
NB1 21	0,06	0,15	1,18	0,49	0,16	5,78	0,33	0,47	100,00	0,20	0,03	0,50
NB1 22	0,06	0,15	1,18	0,49	0,16	5,78	0,33	0,47	100,00	0,20	0,03	0,50
NB1 23	0,06	0,15	1,18	0,49	0,16	5,78	0,33	0,47	100,00	0,20	0,03	0,50
NB1 31	0,06	0,18	1,11	0,36	0,16	9,56	0,33	0,47	100,00	0,20	0,03	0,50
NB1 32	0,06	0,18	1,11	0,36	0,16	9,56	0,33	0,47	100,00	0,20	0,03	0,50
NB1 33	0,06	0,18	1,11	0,36	0,16	9,56	0,33	0,47	100,00	0,20	0,03	0,50
NB2 11	0,06	0,39	1,07	0,28	0,28	32,12	0,30	0,47	100,00	0,20	0,03	0,50
NB2 12	0,06	0,39	1,07	0,28	0,28	32,12	0,30	0,47	100,00	0,20	0,03	0,50
NB2 13	0,06	0,39	1,07	0,28	0,28	32,12	0,30	0,47	100,00	0,20	0,03	0,50
NB2 21	0,06	0,16	1,20	0,54	0,15	27,83	0,30	0,47	100,00	0,20	0,03	0,50
NB2 22	0,06	0,16	1,20	0,54	0,15	27,83	0,30	0,47	100,00	0,20	0,03	0,50
NB2 23	0,06	0,16	1,20	0,54	0,15	27,83	0,30	0,47	100,00	0,20	0,03	0,50
NB2 31	0,06	0,31	1,15	0,44	0,11	15,26	0,30	0,47	100,00	0,20	0,03	0,50
NB2 32	0,06	0,31	1,15	0,44	0,11	15,26	0,30	0,47	100,00	0,20	0,03	0,50
NB2 33	0,06	0,31	1,15	0,44	0,11	15,26	0,30	0,47	100,00	0,20	0,03	0,50

**Fonte: Santos, 2006**

**Tabela. 4 Parâmetros  $G$  e  $cf$  obtidos para todos os eventos de calibração para as parcelas de erosão nas diferentes fases desenvolvimento da cultura do feijoeiro na BRM.**

EVENTO	PRECIPITAÇÃO				G1 e G2	NASH				
	(mm)	Lo (mm)	Lc (mm)	Lo/Lc		(R <sup>2</sup> )	Eo (Kg/ha)	Ec (Kg/ha)	Eo/Ec	Cf
D1	80,00	43,00	46,79	0,92	190,00	0,62	1433,33	1433,33	1,00	107,00
D2	80,00	62,50	62,59	1,00	35,00	0,85	933,33	933,33	1,00	67,00
D3	80,00	64,85	64,76	1,00	22,00	0,81	1433,33	1433,33	1,00	107,00
CN 1	80,00	0,77	0,76	1,01	170,00	-0,30	0,00	15,33	0,00	50,00
CN 2	80,00	0,59	0,58	1,02	188,00	-0,21	21,00	20,67	1,02	150,00
CN 3	80,00	0,55	0,55	1,00	190,00	-0,05	9,67	9,67	1,00	7,00
MA 11	80,00	33,23	33,32	1,00	290,00	0,67	733,33	733,33	1,00	65,00
MA 12	80,00	63,11	62,20	1,01	25,00	0,67	1000,00	1000,00	1,00	72,00
MA 13	80,00	31,61	31,64	1,00	335,00	0,75	566,67	566,67	1,00	47,00
MA 21	80,00	63,80	62,58	1,02	50,00	0,59	433,33	466,67	0,93	65,00
MA 22	80,00	40,40	42,55	0,95	50,00	0,47	666,67	666,67	1,00	15,00
MA 23	80,00	74,75	73,48	1,02	30,00	0,78	866,67	833,33	1,04	65,00
MA 31	80,00	37,35	42,99	0,87	60,00	0,48	400,00	400,00	1,00	55,00
MA 32	80,00	47,78	50,80	0,94	40,00	0,59	533,33	533,33	1,00	71,00
MA 33	80,00	64,35	64,58	1,00	55,00	0,74	933,33	933,33	1,00	20,00
CM 11	80,00	33,23	33,32	1,00	40,00	0,67	200,00	200,00	1,00	40,00
CM 12	80,00	63,11	62,20	1,01	55,00	0,67	100,00	66,67	1,50	60,00
CM 13	80,00	31,61	31,64	1,00	50,00	0,75	0,00	0,00	-	-
CM 21	80,00	63,80	62,58	1,02	5,00	0,59	33,33	33,33	1,00	3,00
CM 22	80,00	40,40	42,55	0,95	15,00	0,47	66,67	66,67	1,00	10,00
CM 23	80,00	74,75	73,48	1,02	80,00	0,78	33,33	33,33	1,00	7,00
CM 31	80,00	37,35	42,99	0,87	5,00	0,48	33,33	33,33	1,00	5,00
CM 32	80,00	47,78	50,80	0,94	7,60	0,59	33,33	33,33	1,00	5,00
CM 33	80,00	64,35	64,58	1,00	100,00	0,74	0,00	0,00	1,00	--



**Continuação Tabela. 4 Parâmetros  $G$  e  $cf$  obtidos para todos os eventos de calibração para as parcelas de erosão nas diferentes fases de desenvolvimento da cultura do feijoeiro na BRM.**

EVENTO	PRECIPITAÇÃO				NASH					
	(mm)	Lo (mm)	Lc (mm)	Lo/Lc	G1 e G2	(R <sup>2</sup> )	Eo (Kg/ha)	Ec (Kg/ha)	Eo/Ec	Cf
NB1 11	80,00	27,31	27,39	1,00	40,00	-0,33	200,00	200,00	1,00	40,00
NB1 12	80,00	28,66	28,21	1,02	55,00	0,85	100,00	66,67	1,50	60,00
NB1 13	80,00	24,40	24,64	0,99	50,00	0,87	0,00	0,00	-	-
NB1 21	80,00	62,30	60,00	1,04	5,00	0,92	33,33	33,33	1,00	3,00
NB1 22	80,00	61,75	60,00	1,03	15,00	0,85	66,67	66,67	1,00	10,00
NB1 23	80,00	67,55	62,88	1,07	80,00	0,85	33,33	33,33	1,00	7,00
NB1 31	80,00	52,46	52,60	1,00	5,00	0,51	33,33	33,33	1,00	5,00
NB1 32	80,00	0,19	0,19	1,00	7,60	0,89	33,33	33,33	1,00	5,00
NB1 33	80,00	52,43	52,89	0,99	100,00	0,86	0,00	0,00	-	-
NB2 11	80,00	20,60	20,03	1,03	160,00	0,76	766,67	733,33	1,05	190,00
NB2 12	80,00	20,80	20,28	1,03	155,00	0,53	233,33	233,33	1,00	35,00
NB2 13	80,00	25,15	25,03	1,00	80,00	0,74	666,67	666,67	1,00	140,00
NB2 21	80,00	33,51	33,57	1,00	35,00	0,92	833,33	833,33	1,00	90,00
NB2 22	80,00	35,56	35,34	1,01	25,00	0,90	333,33	333,33	1,00	28,00
NB2 23	80,00	40,03	36,36	1,10	20,00	0,80	400,00	400,00	1,00	32,00
NB2 31	80,00	36,31	41,24	0,88	90,00	0,50	933,33	933,33	1,00	150,00
NB2 32	80,00	29,50	38,78	0,76	120,00	0,31	300,00	300,00	1,00	40,00
NB2 33	80,00	37,18	40,19	0,93	105,00	0,51	866,67	866,67	1,00	135,00

Os resultados obtidos na calibração dos parâmetros para os eventos analisados relacionados ao escoamento superficial apresentaram bons ajustes representados pelo coeficiente de determinação e também levando em conta o erro médio no volume total escoado e na vazão de pico, com exceção para o evento referente ao tratamento com cobertura natural, onde o comportamento simulado pelo programa apresentou-se diferenciado ao comportamento observado, quando se comparado a distribuição dos dois no tempo.

Nas Figuras 06 a 19, são apresentados os hidrogramas para todos os eventos.

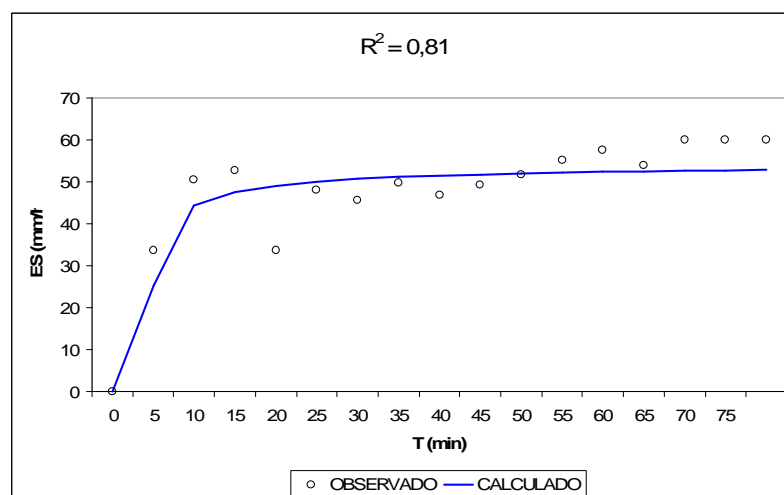
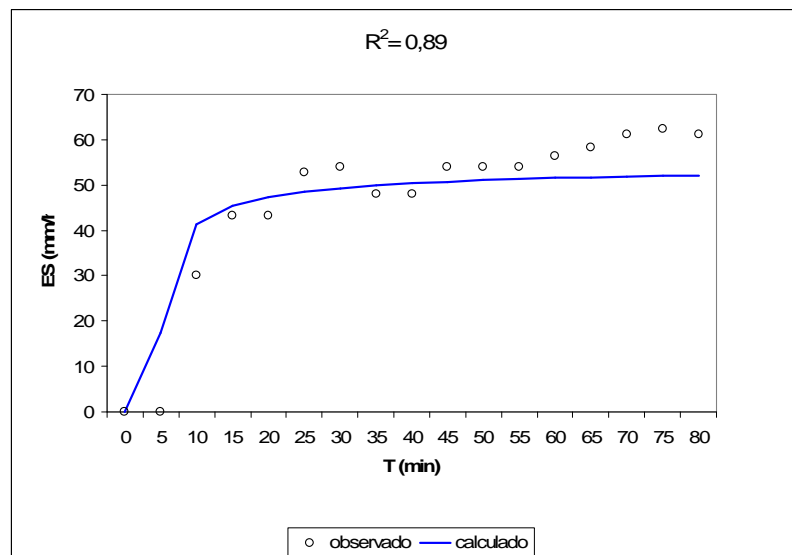
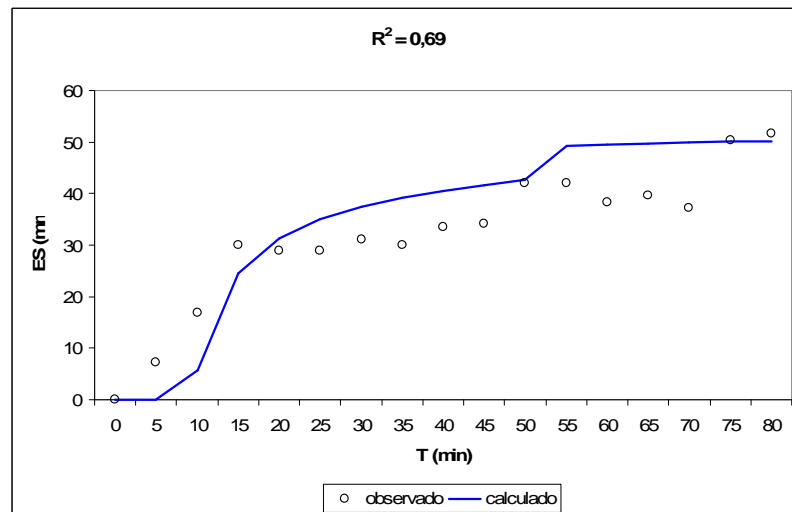


FIGURA 6 - Calibração da Vazão para os eventos D1, D2 e D3 respectivamente da BRM em parcela experimental.

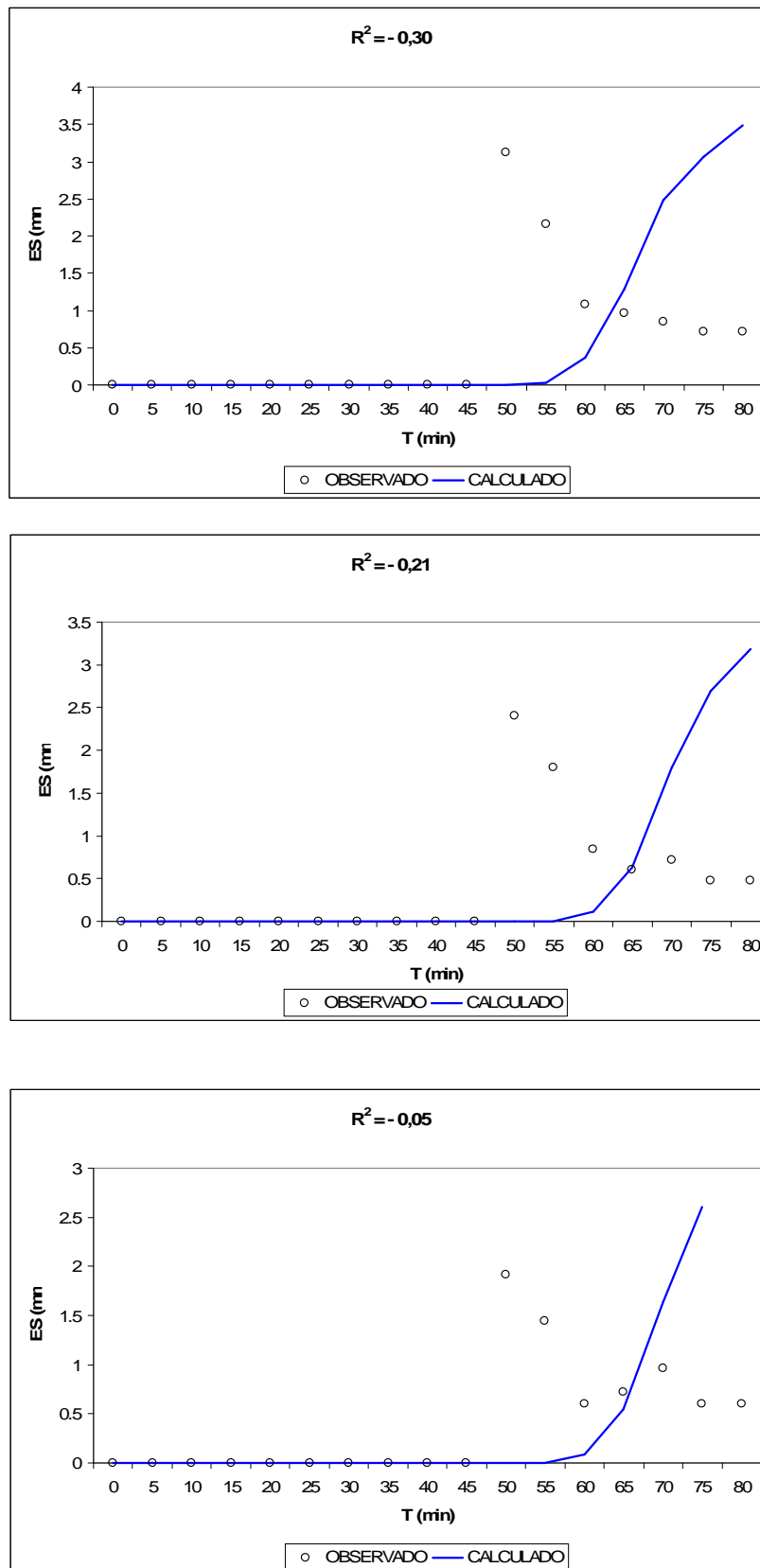


FIGURA 7 - Calibração da vazão para os eventos CN1, CN2 e CN3 respectivamente da BRM em parcela experimental

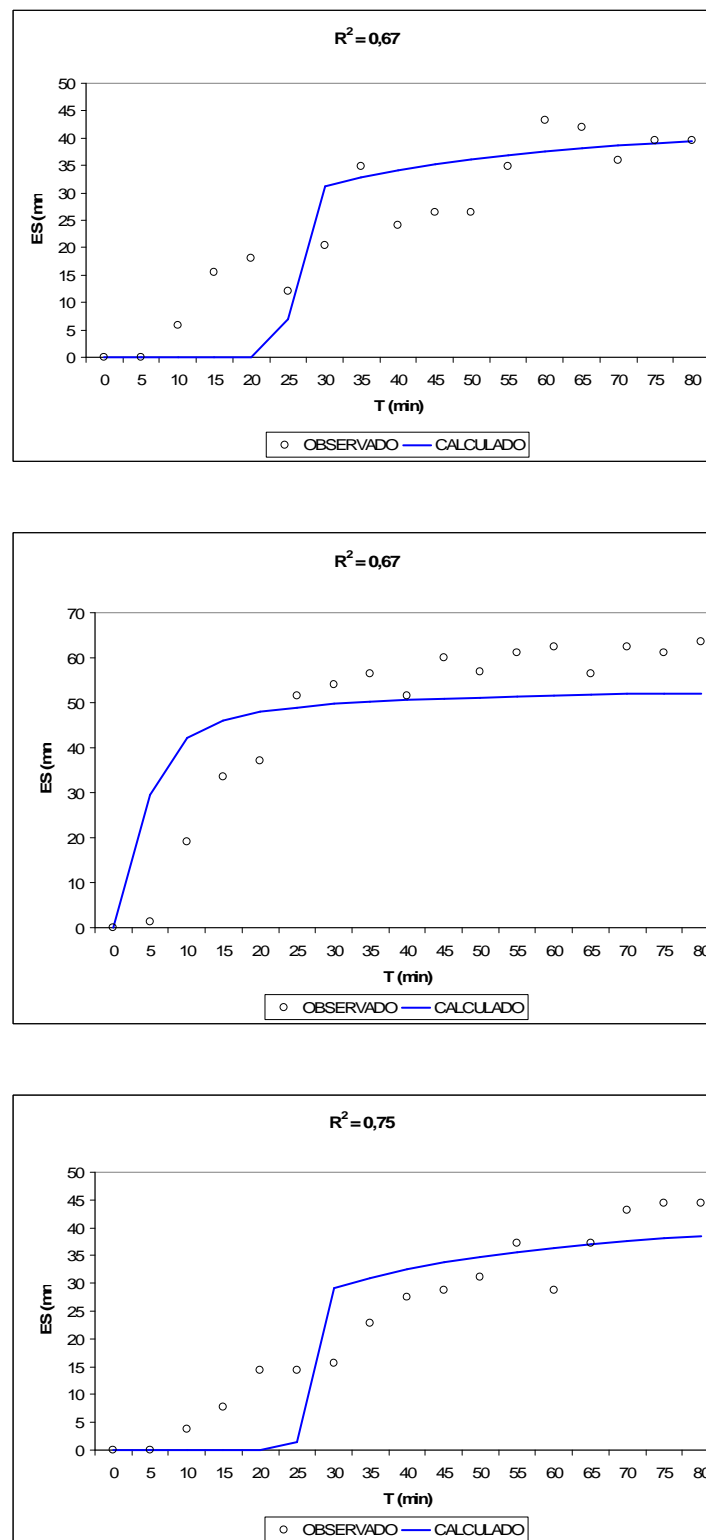


FIGURA 8 - Calibração da Vazão para os eventos MA 11, MA 12 e MA 13 respectivamente da BRM em parcela experimental.

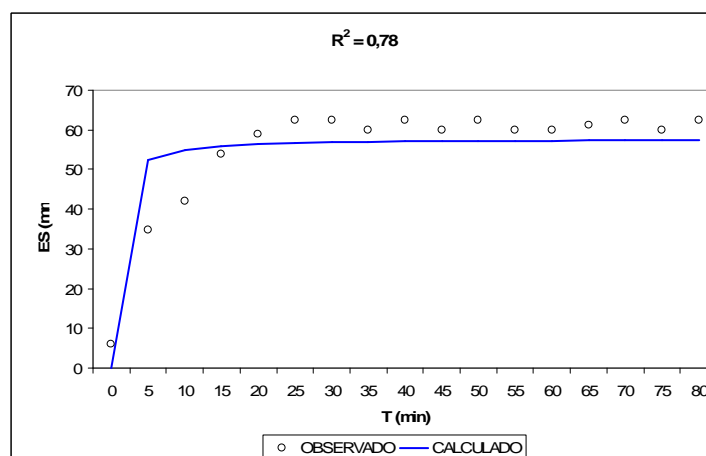
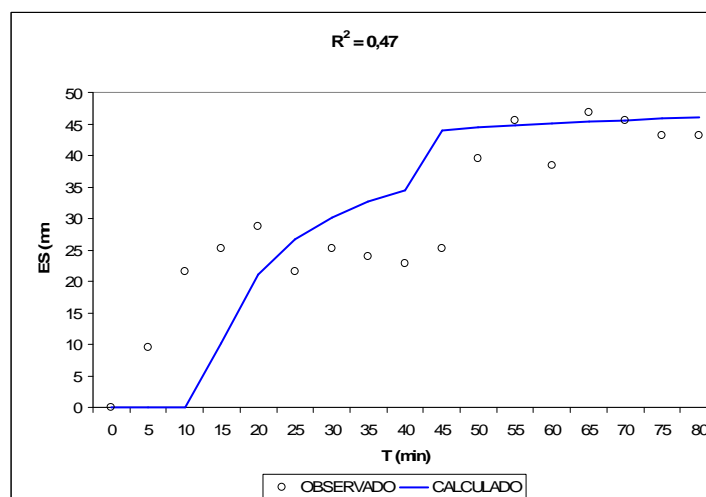
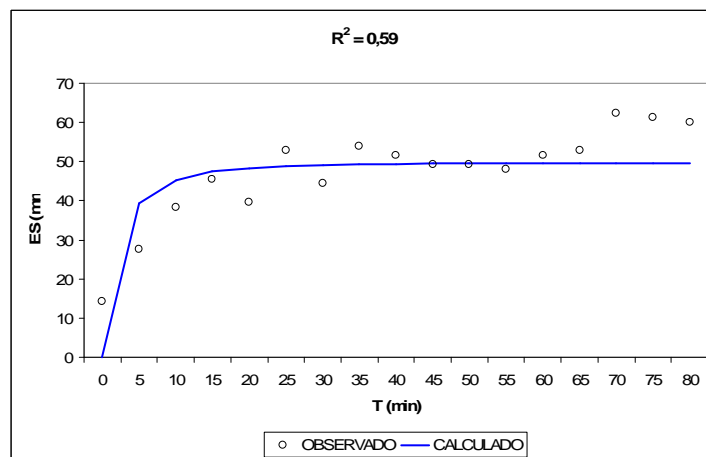


FIGURA 9 - Calibração da Vazão para os eventos MA 21, MA 22 e MA 23 respectivamente da BRM em parcela experimental.

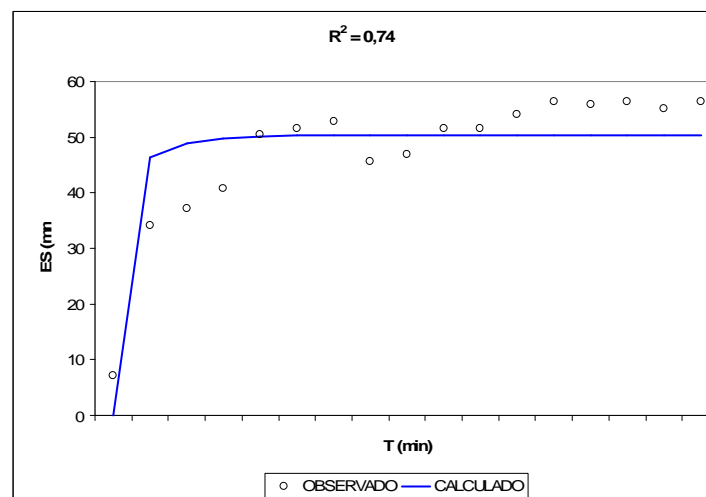
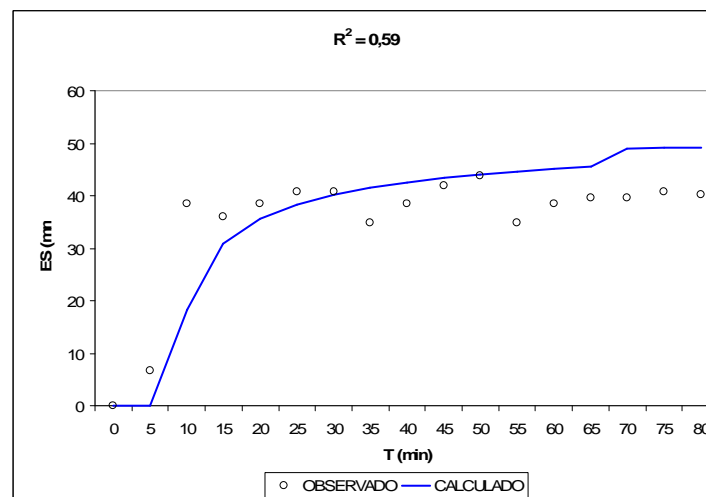
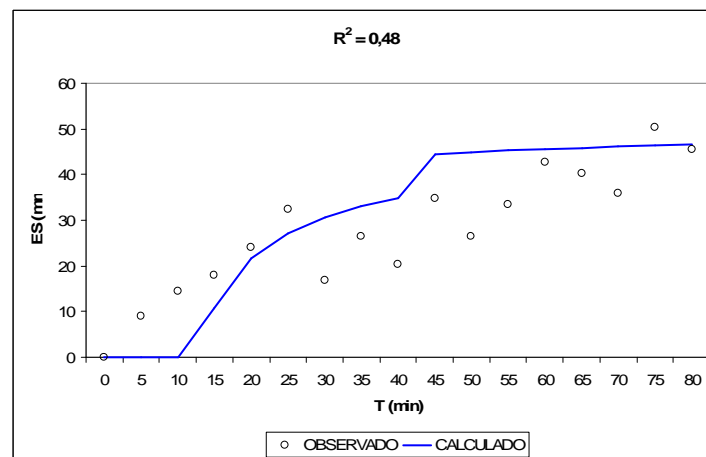


FIGURA 10 - Calibração da Vazão para os eventos MA 31, MA 32 e MA 33 respectivamente da BRM em parcela experimental.

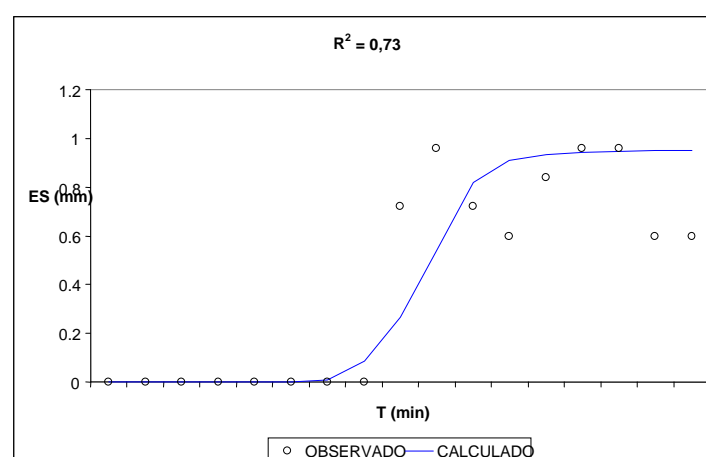
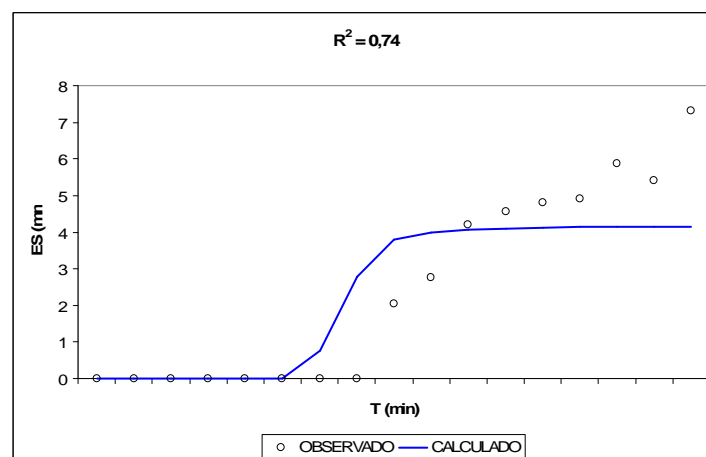
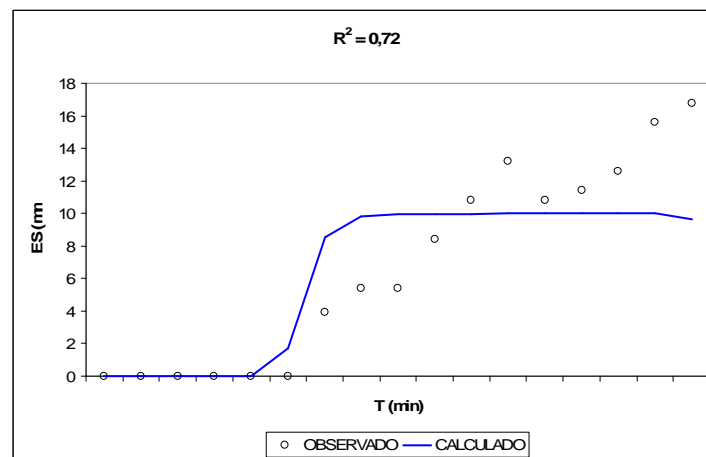


FIGURA 11 - Calibração da Vazão para os eventos CM 11, CM 12 e CM 13 respectivamente da BRM em parcela experimental.



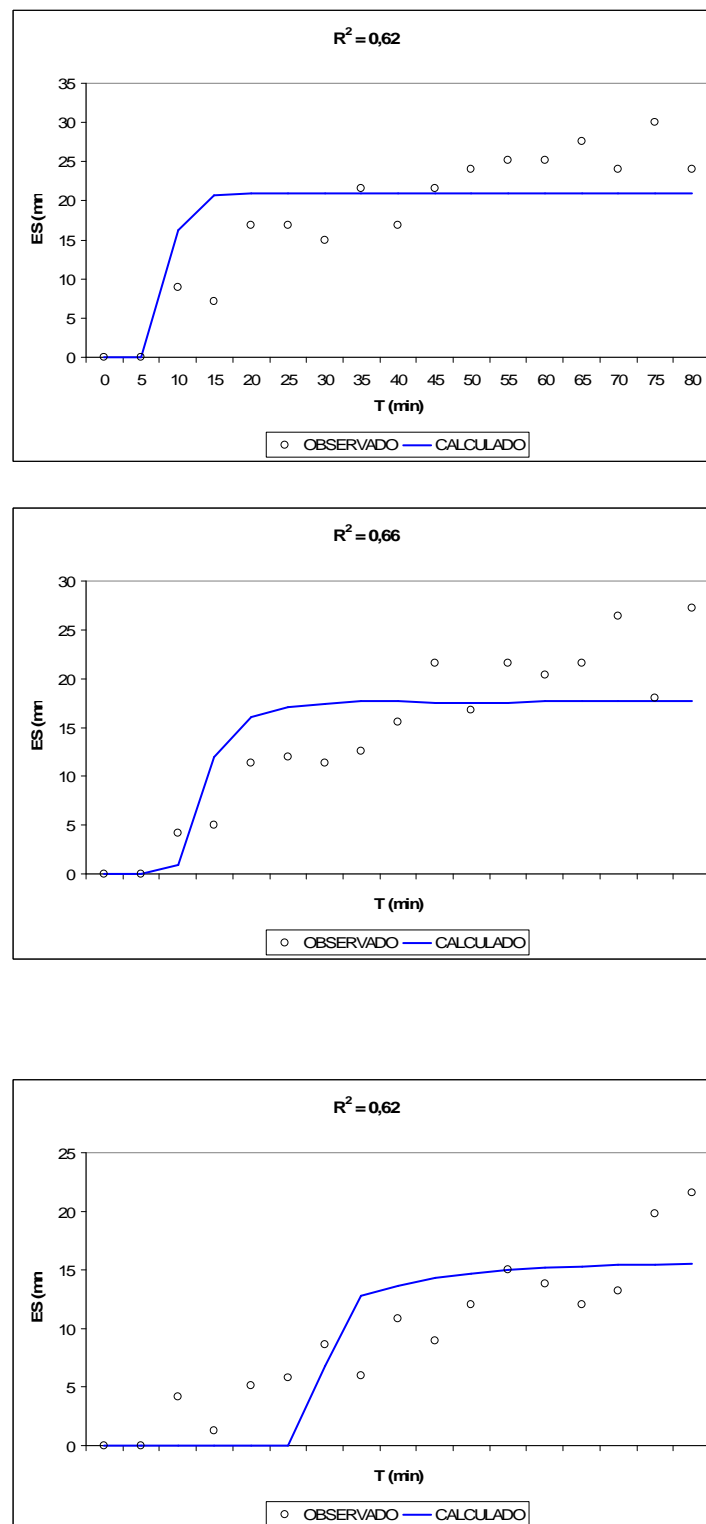


FIGURA 12 - Calibração da Vazão para os eventos CM 21, CM 22 e CM 23 respectivamente da BRM em parcela experimental.

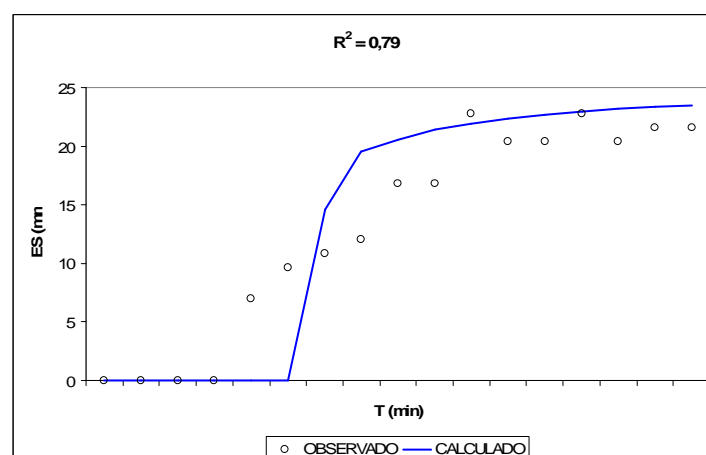
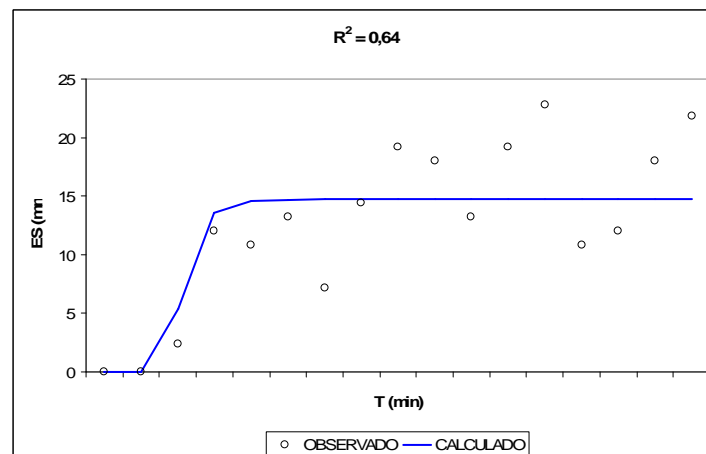
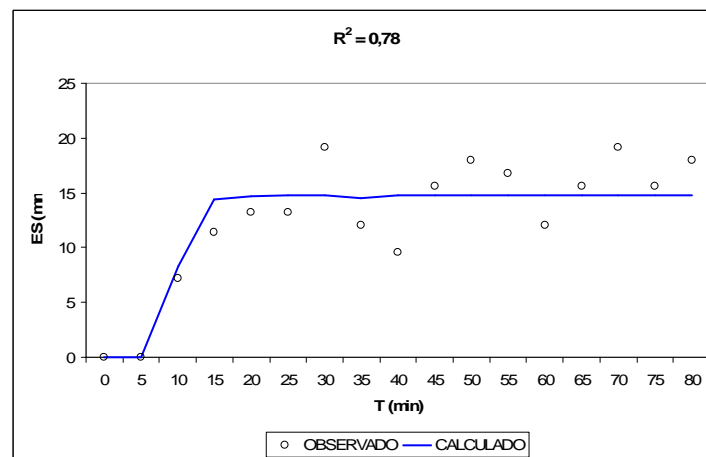


FIGURA 13 - Calibração da Vazão para os eventos CM 31, CM 32, CM 33 respectivamente da BRM em parcela experimental.

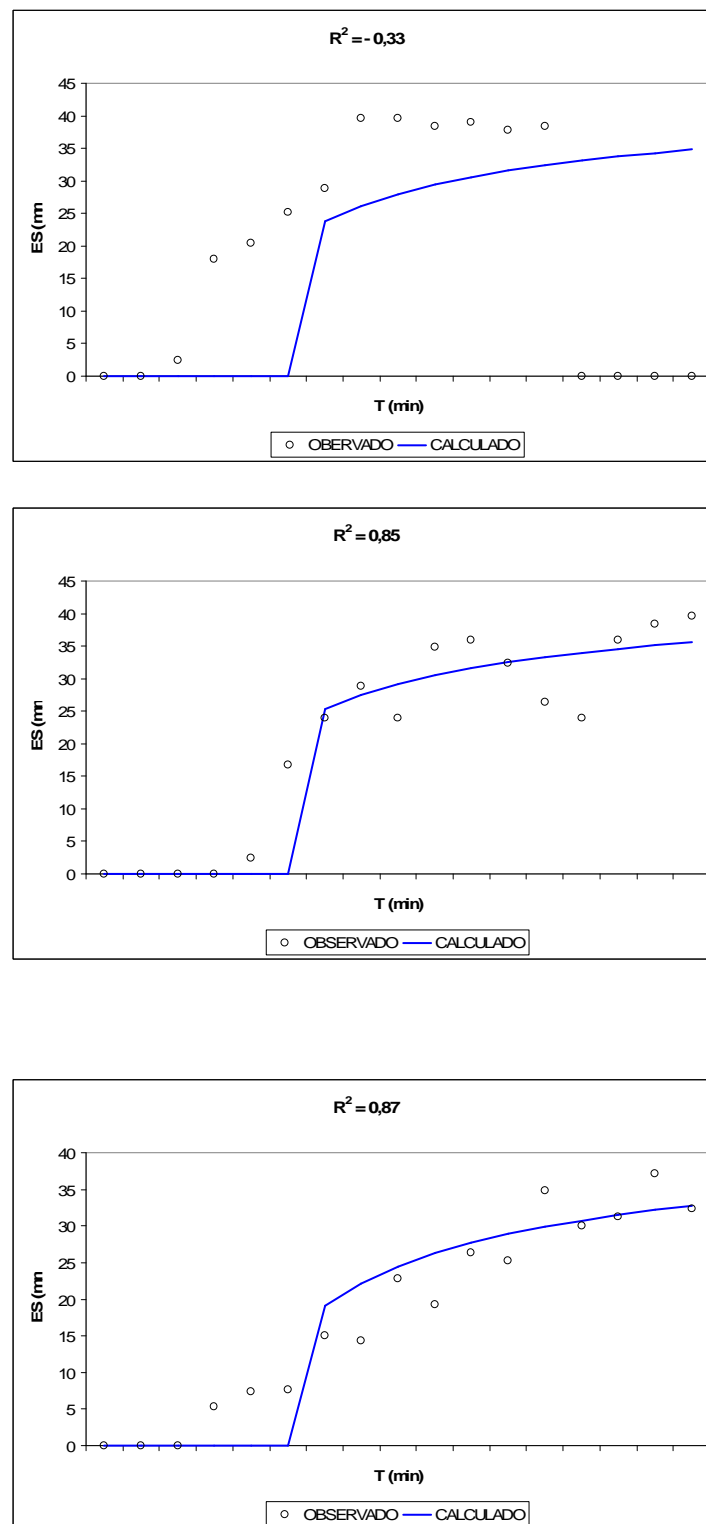


FIGURA 14 - Calibração da Vazão para os eventos NB1 11, NB1 12 e NB1 13 respectivamente da BRM em parcela experimental.

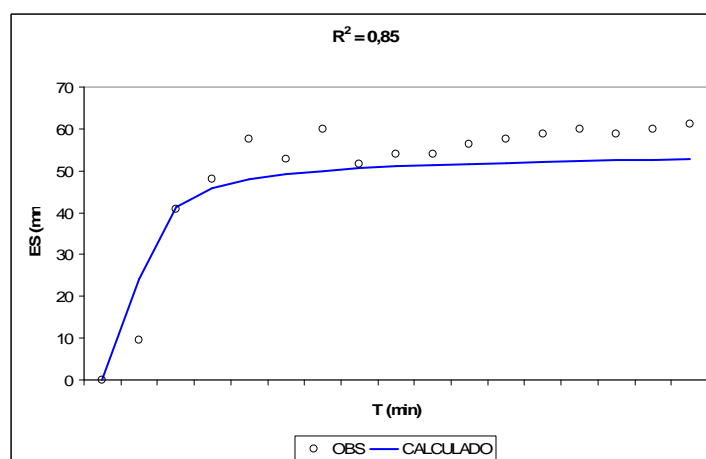
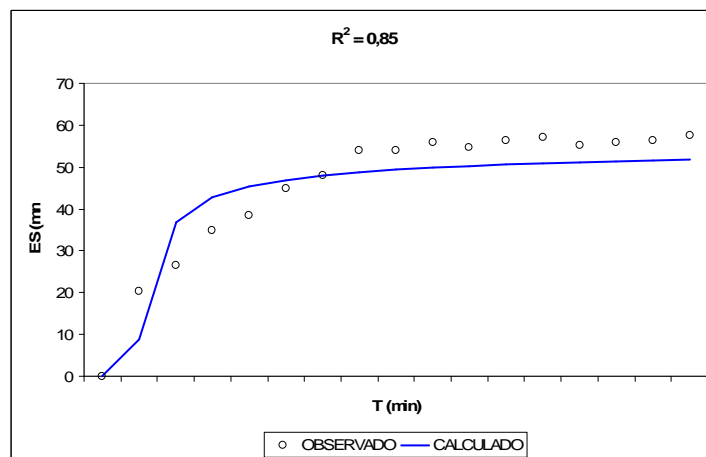
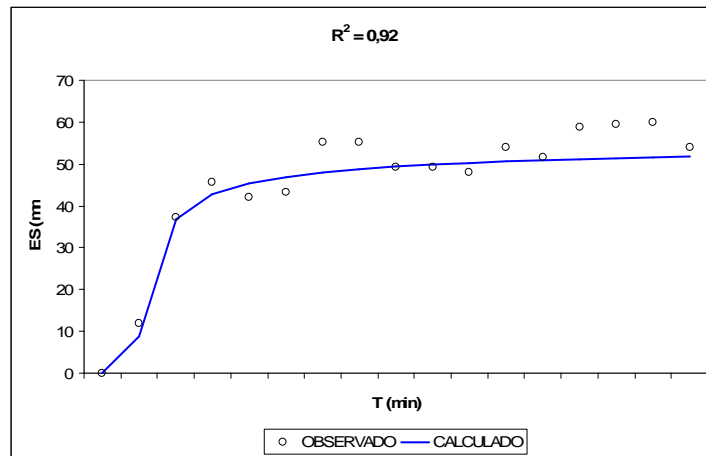


FIGURA 15 - Calibração da Vazão para os eventos NB1 21, NB1 22 e NB1 23 respectivamente da BRM em parcela experimental.

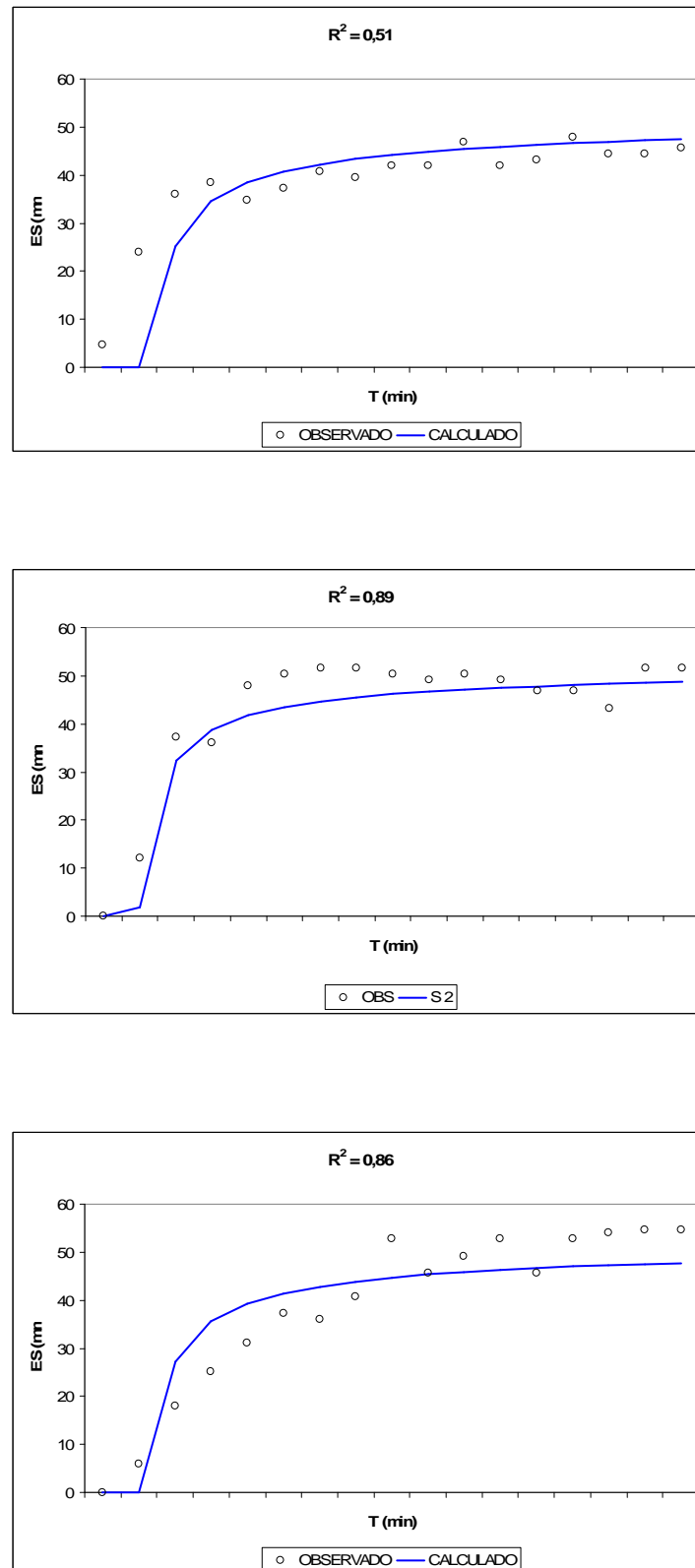


FIGURA 16 - Calibração da Vazão para os eventos NB1 31, NB1 32 e NB1 33 respectivamente da BRM em parcela experimental.

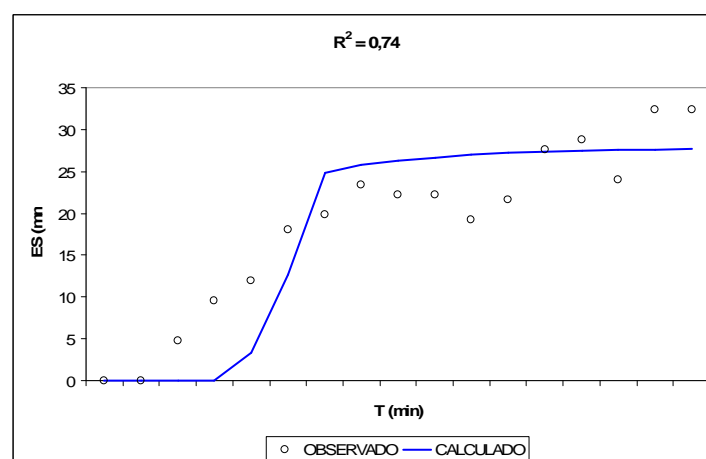
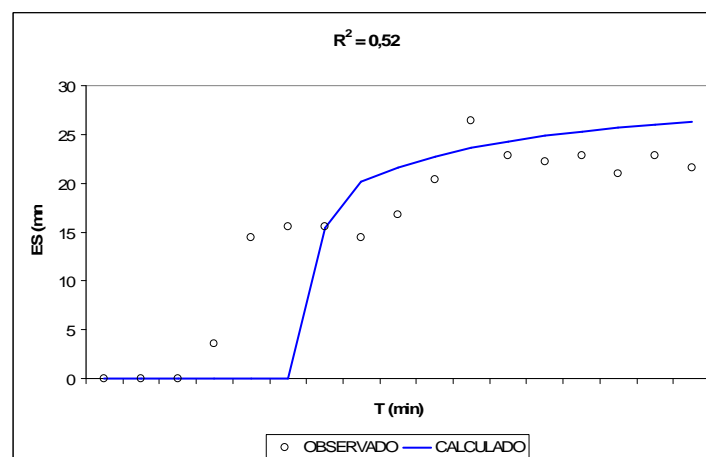
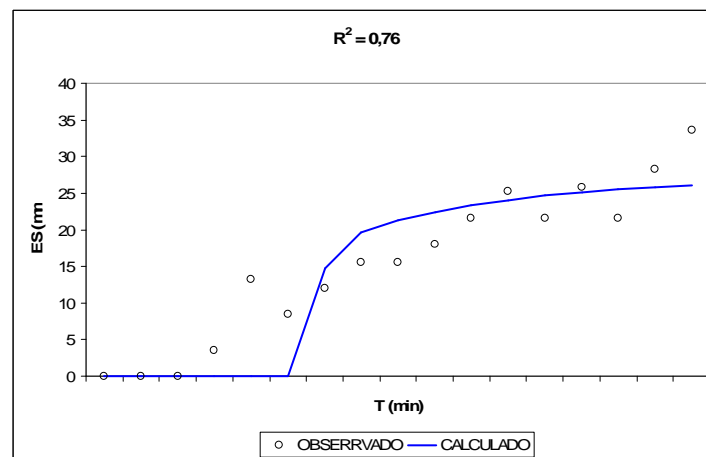


FIGURA 17 - Calibração da Vazão para os eventos NB2 11, NB2 12 e NB2 13 respectivamente da BRM em parcela experimental.

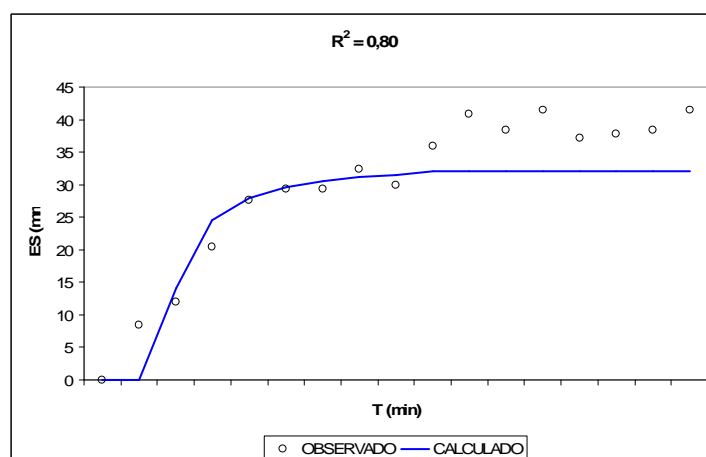
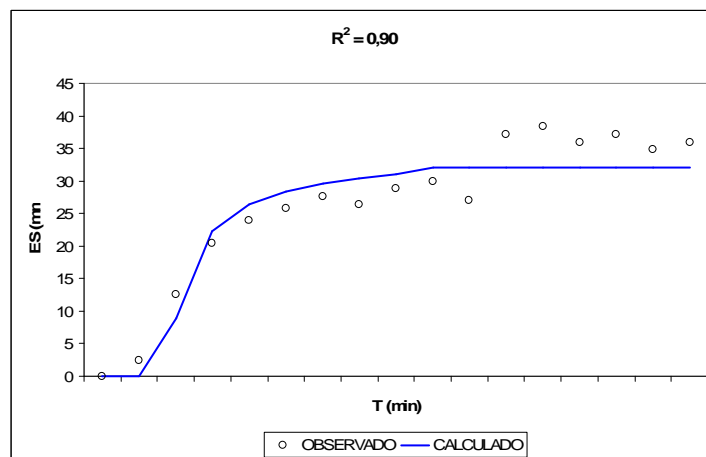
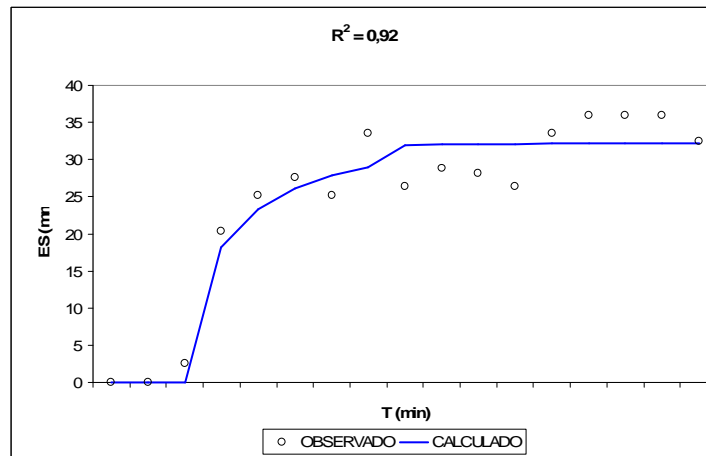


FIGURA 18 - Calibração da Vazão para os eventos NB2 21, NB2 22 e NB2 23 respectivamente da BRM em parcela experimental.

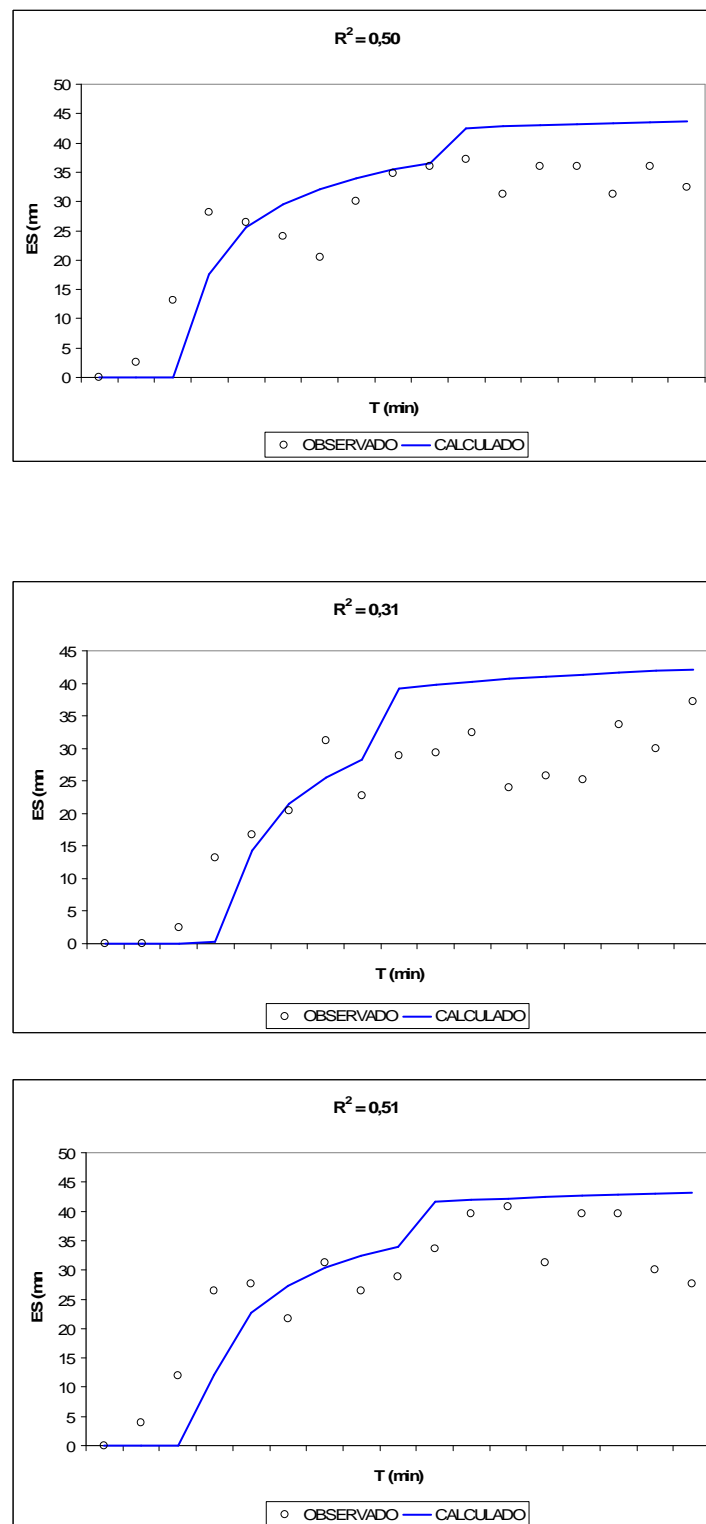


FIGURA 19 - Calibração da Vazão para os eventos NB2 31, NB2 32 e NB2 33 respectivamente da BRM em parcela experimental.



**Tabela 5. Valores do coeficiente de determinação Nash & Sutcliffe ( $R^2$ ) e análise estatística, obtidos na calibração dos eventos individuais de escoamento superficial.**

EVENTO	NASH ( $R^2$ )	EVENTO	NASH ( $R^2$ )
D1	0,62	CM 31	0,48
D2	0,85	CM 32	0,59
D3	0,81	CM 33	0,74
CN 1	-0,30	NB1 11	-0,33
CN 2	-0,21	NB1 12	0,85
CN 3	-0,05	NB1 13	0,87
MA 11	0,67	NB1 21	0,92
MA 12	0,67	NB1 22	0,85
MA 13	0,75	NB1 23	0,85
MA 21	0,59	NB1 31	0,51
MA 22	0,47	NB1 32	0,89
MA 23	0,78	NB1 33	0,86
MA 31	0,48	NB2 11	0,76
MA 32	0,59	NB2 12	0,53
MA 33	0,74	NB2 13	0,74
CM 11	0,67	NB2 21	0,92
CM 12	0,67	NB2 22	0,90
CM 13	0,75	NB2 23	0,80
CM 21	0,59	NB2 31	0,50
CM 22	0,47	NB2 32	0,31
CM 23	0,78	NB2 33	0,51
Média			0,61
Mediana			0,67
Moda			0,85
Desvio padrão			0,31
Mínimo			-0,33
Máximo			0,92

Os eventos (NB 1), referentes ao tipo de cobertura feijão em nível com barramento de pedra a 0,5 m de distância, junto com o eventos correspondentes às parcelas experimentais sem cobertura ou desmatada (D), foram os que apresentaram os melhores resultados com relação ao coeficiente de determinação de Nash & Sutcliffe ( $R^2$ ), com valor médio 0,78, valor este maior do que a média geral dos eventos simulados. Os piores resultados foram obtidos para os eventos em parcelas com cobertura natural, com valores Nash & Sutcliffe ( $R^2$ ) inferiores a zero.

## 6. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Para a vazão ou escoamento superficial, Silva (2005) encontrou valores de coeficiente de determinação ( $R^2$ ), os quais medem o nível de eficiência da calibração, variando entre 0,71 a 0,77, trabalho realizado a nível de bacia, enquanto que neste trabalho o coeficiente de determinação ( $R^2$ ) variou entre 0,47 e 0,92, em 88% dos eventos analisados, com um valor médio 0,61, conforme Tabela 5. Pode-se admitir que os resultados encontrados neste estudo são satisfatórios devido ao fato das dimensões da área em estudo serem bastante diminutas e quando se compara com outros trabalhos da literatura. Por exemplo, Kalin et al., (2003), em 2 bacias experimentais em Cincinnati-Estados Unidos da América, em um total de 40 eventos, obteve para o coeficiente de determinação de Nash-Sutcliffe valores médios variando 0,48 e 0,64, considerados por estes autores como satisfatórios.

Com relação à produção de sedimentos o coeficiente de determinação de Nash-Sutcliffe, não apresentou desempenhos satisfatórios que possibilitassem o processo de calibração dos parâmetros físicos do solo e representassem os sedigramas cada evento, uma baixa correlação entre os sedigramas observados e os simulados, com valores de  $R^2$  menores que zero, indo de encontro com os resultados obtidos por Daronco (2008), que trabalhando em duas pequenas bacias embutidas na Bacia do Arroio Rio Vacacaí-Mirim, em Santa Maria-RS, onde o mesmo obteve excelentes resultados tanto para a produção de sedimentos, quanto de escoamento superficial, trabalhando com chuva natural.

Com relação aos parâmetros físicos do solo, foi calibrado inicialmente o parâmetro de capilaridade ( $G$ ), parâmetro de escoamento, o qual varia evento a evento em virtude de variar de acordo com as condições intrínsecas do solo. O  $G$  mostrou em todas as unidades estudadas uma facilidade para a calibração, apesar de apresentar uma

grande variação entre valores obtidos para cada evento, entre 5 e 300, com um valor médio igual a 80, valor este abaixo do indicado por Ralws et al. 1982 que é de 260 mm para este tipo de solo. Não se pode comparar com demais trabalhos da bibliografia, uma vez que os mesmos lançam mão de valores fixos indicados na literatura de acordo com o tipo de solo.

O mesmo processo foi realizado para a erosão causada pelo impacto das gotas de chuva (*cf*), onde os resultados demonstraram uma grande variação, valores na faixa de 3 a 190 (Tabela 4). Resultados semelhantes foram discutidos por Lopes (2003) e Paiva (2008).

Considerando a pesquisa ter sido realizada somente a nível de escala de parcela, o parâmetro *cf* passa a ser preponderante com relação a processo erosivo em pequenas escalas. Segundo Santos (2008), quando se trabalha com escalas maiores, deve-se considerar que os planos discretizados na sub-bacia seriam perfeitamente planos, o que seria favorável à erosão pelo impacto das gotas de chuva (*cf*).

A melhor representação de um plano seria a própria parcela de erosão, e nesse caso a erosão principal ocorre pelo impacto das gotas de chuva. Nas sub-bacias, quando discretizadas, os planos são muito maiores do que as parcelas, e também, maiores do que as próprias micro-bacias; logo, nem toda a região do plano é totalmente plana, e em algumas partes começa a ocorrer à presença de sulcos formados pela concentração do escoamento superficial. A presença desses sulcos causa erosão concentrada, com a predominância da ação de cisalhamento na erosão das partículas e a coesão resistindo essa erosão. Dessa forma, o parâmetro *cf* deixa de ser o parâmetro mais importante no processo de erosão nas sub-bacias. Daí, no processo de erosão e transporte de sedimentos, o parâmetro básico que influencia a produção de sedimentos seria *co*, que representa a coesão entre as partículas do solo.

Vale ressaltar que enquanto não é realizada uma observação física em campo para verificar o processo real, o parâmetro  $cf$  deve ser analisado de forma indireta.

Voltando aos resultados obtidos, houve êxito com relação a predição dos totais, tanto de volume escoado, quanto de produção de sedimentos, conforme Tabela 4. Os valores correlacionados entre o simulado e observado estão em sua maioria próximos de 1, o que reflete um excelente poder de predição do modelo para o valores totais de cada evento.

O erro da produção total de sedimentos, assim como da vazão total foram baixos, como se pode observar na Tabela 4, onde foi calculada a razão entre os valores de erosão calculados pelos valores de erosão observados ( $Ec/Eo$ ), assim como a razão dos valores das vazões totais calculadas e vazões totais observadas ( $Lc/Lo$ ), que em mais de 90% dos eventos tiveram valor igual ou bem próximo da relação ideal a 1.

A análise dos resultados da aplicação do modelo Kineros2, nas parcelas de erosão da BRM, mostra que o ponto de vista da estimativa dos hidrogramas o modelo teve um bom desempenho.

Já com relação à estimativa da produção de sedimentos, embora os resultados possam ser considerados satisfatórios, à luz do estado da arte da previsão de sedimentos, eles reforçam a necessidade do desenvolvimento de pesquisas de campo que forneçam os dados sob diferentes condições de clima, relevo, tipo e uso do solo para permitir o desenvolvimento e avaliação de modelos de estimativa da produção de sedimentos em diferentes escalas. Trabalhos como os de Paiva (2008), Daronco (2008) e Santos (2008) enfatizam bem a questão da escala sobre variação da sensibilidade dos parâmetros calibrados, de acordo com o tamanho da área do elemento usado na simulação, pois neste trabalhos os autores trabalham não só a nível de parcela experimental, mas de

microbacia e sub-bacia, ou seja, podendo utilizar os resultados a nível de parcelas para trabalhos em escalas maiores.

Outro ponto que merece destaque é com relação a ineficiência do modelo para predição com relação do hidrograma do tratamento referente a cobertura natural (CN), embora o modelo tenha apresentado bons resultados com relação a vazão total escoada, não se obteve o mesmo resultado na construção do hidrograma, pois o modelo não conseguiu representar de forma eficiente a distribuição da vazão durante o tempo do evento. Isto pode ser justificado devido à interferência da capacidade de interceptação da cobertura vegetal e da contribuição do escoamento caulinar, que apresentam comportamento totalmente discrepante dos demais tratamentos. Pode-se observar um retardamento no início do escoamento, seguido em um pico de vazão ocasionado provavelmente pela superação da capacidade de interceptação foliar da cobertura; logo em seguida, observa-se uma queda brusca desta vazão, uma vez que é recobrada a capacidade de interceptação foliar original.

Embora exista na literatura alguns trabalhos utilizando o modelo Kineros2 para eventos envolvendo escoamento superficial e produção de sedimentos, a maioria dos autores das pesquisas realizadas em território nacional possuem dados de campo coletados no momento do evento, em ambiente controlado como foi realizado neste estudo, o que de certa forma pode ocasionar uma distinção nos resultados alcançados e até mesmo na verificação do desempenho do modelo.

## 7. CONCLUSÕES

As principais conclusões advindas deste trabalho são:

- a) O modelo Kineros2 mostrou-se bastante confiável com resultados robustos, tanto para o escoamento superficial como para a produção de sedimento, em nível da região semiárida pernambucana;
- b) Os parâmetros  $G$  e  $cf$  do modelo Kineros2 apresentaram uma faixa de variação muito grande na fase de calibração, o que dificulta a obtenção de um valor médio representativo característico da parcela; obteve-se valores com uma faixa de variação de 5 a 300 e de 3 a 190, para os respectivos parâmetros;
- c) O trabalho chama a atenção para a importância de futuras pesquisas direcionadas para identificação e controle de áreas susceptíveis ao processo de erosão na bacia. Pode-se concluir que a aplicação do modelo Kineros2 é viável, e pode ser usado em estudos de modelagem de vazão e produção sedimentos em outras regiões semiáridas do NEB;
- d) Recomenda-se ainda a realização de estudos mais específicos com relação à aplicação do modelo Kineros2 para condição de cobertura natural do solo no processo de predição de escoamento superficial e produção de sedimentos.
- e) O modelo apresentou resultados satisfatórios para condição de escoamento superficial, com o valor de  $R^2$  médio igual a 0,61.

## 8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALBUQUERQUE, A.W.; LOMBARDI NETO, F.; SRINIVASAN, V.S. Efeito do desmatamento da caatinga sobre as perdas de solo e água de um Luvissole em Sumé (PB). *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.25, n.1, p.121-128, 2001.

ALONSO, C. V., NEIBLING, W. H. & FOSTER, G. R. Estimating Sediment Transport Capacity in Watershed Modeling. *American Society of Agricultural Engineers*, v. 24, n.5, p.1211-1220, 1981.

AL-QURASHI, A.; MCINTYRE, N.; WHEATER, H.; UNKRICH, C. Application of the Kinos2 rainfall-runoff model to an arid catchment in Oman. *Journal of Hydrology*, v. 355, p.91-105, 2008.

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

ARAGÃO, R. Estimativa dos Parâmetros do Modelo Distribuído WESP com os dados da Bacia Experimental de Sumé. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande, 2000. 160f.

ARAÚJO, J.C. Assoreamento em reservatórios do semiárido : modelagem e validação. Porto Alegre: RBRH – *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, ABRH, vol.8, n.2, 2003.

AUDRY, P., CADIER, E., LEPRUN, J. C. e MOLINIER, M. Dinâmica da água e das matérias em um ecossistema representativo do Nordeste Brasileiro. Condições de extrapolação espacial na escala regional. Recife, ATP-PIREN, ORSTOM. 1987.

BANDEIRA, J. V. Estudio del comportamiento del sedimento de fondo em el rio de la plata, em la region de Puerto Carmelo, com el empleo de trazador radioactivo. In: Encontro Nacional de Engenharia de Sedimentos, Belo Horizonte. ABRH, p. 325-333, 1998.

BATHURST, J.C., WICKS, J.M., e O'CONNELL, P.E. The SHE/SHESED Basin Scale Water Flow and Sediment Transport Modelling System. In: V.P.Singh (editor). Computer Models of Watershed Hydrology. Water Resources Publications, Highlands Ranch, Colorado, United States, 1995.

BATHURST, J.C. Physically-Based Distributed Modelling of an Upland Catchment Using the Système Hydrologique Européen. Journal of Hydrol., v. 87, p. 79-102, 1986.

BELLINASSO, T. B; PAIVA, J. B. D. Avaliação da Produção de Sedimentos em Eventos Chuvosos em uma Pequena Bacia Hidrográfica Semi-Urbana de Encosta. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v.12, n.4, p.169-181, 2007.

BENNETT, J. P. Concepts of mathematical modeling of sediment yield. Water Resources Research, v. 10, n.3, p. 485-492, 1974.

BESKOW, S.; MELLO, C. R.; NORTON, L. D.; CURI, N.; VIOLA, M. R.; AVANZI, J. C. Soil erosion prediction in the Grande River Basin, Brazil using distributed modeling. Catena, v.4, p.49-59, 2009.



BEVEN, K. Changing Ideas in Hydrology - The Case of Physically Based Models. *Journal of Hydrology*, v. 105, p. 157-172, 1989.

BEZERRA, S.A. & CANTALICE, J.R.B. Erosão entre sulcos em diferentes condições de cobertura do solo, sob cultivo da cana-de-açúcar. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 30, p. 565-573, 2006.

BEZERRA, S.A.; CANTALICE, J.R.B. & TARQUI, J.L.Z. Características do escoamento superficial e taxas de erosão em uma área sob cultivo agrícola. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE SEDIMENTOS. 5.; São Paulo, 2002. Anais. São Paulo, ABRH, p. 403-411. 2002.

BRASIL. Ministério da Integração Nacional. Câmara dos Deputados. Nova delimitação do semi-árido brasileiro. Estudo. Brasília, DF, nov. 2007. p.24.

BRASIL. Ministério da Integração Nacional/SDR. Relatório Final do Grupo de Trabalho Interministerial para Redelimitação do Semi-árido Nordeste e do Polígono das Secas. Brasília, DF, 2005. p.33.

BROOKS, R. H. & COREY, A. T. Hydraulic Properties of Porous Media. *Hydrology Paper*, n. 3, Colorado State Univ., Fort Collins, 1964.

CADIER, E. & FREITAS, B. J. Bacia Representativa de Sumé: Primeira Estimativa dos Recursos de Água. Recife, SUDENE, 1982. 195p.

CARVALHO, N. O.; FILIZOLA JUNIOR, N. P.; COUTINHO, P. M. S.; LIMA J. E. F. W. Determinação da produção de sedimentos. Em: Guia de Avaliação de Assoreamento

de Reservatórios. ANEEL, Superintendência de Estudos e Informações Hidrológicas. p. 25-56, 2000.

CERDA, A. & LASANTA, T. Long-term erosional responses after FIRE in the central spanish pyrenees 1. water and sediment yield. *Catena*. V. 60, p. 59-80, 2005.

COUTO, V.A.; ALVES, A.F.; GUANZIROLI, C.E. A agricultura familiar na região Nordeste [Salvador, BA]: FAO/INCRA, 1996. 53 p.il. Versão preliminar Projeto: UFT/BR/036/BR.

CHOW, V. T., MAIDMENT. D. R. e MAYS, L. W. *Applied Hydrology*. McGraw-Hill Series in Water Resources and Environmental Engineering, Singapore, p.572. DeCOURSEY, D.G. Runoff, erosion and crops yield simulation for land use management. *Transactions of the ASAE*, v.23, n.2, p.379-386, 1980.

CHOW, V. T., MAIDMENT. D. R. E MAYS, L. W. *Applied Hydrology*. McGraw-Hill Series in Water Resources and Environmental Engineering, Singapore, 1988. p.572.

CHU, S. T. Infiltration during an unsteady rain. *Water Resources Research*, v. 14, n. 3, p. 461-466, 1978.

COLLISCHONN, W. Simulação hidrológica de grandes bacias. Tese de Doutorado. Instituto de Pesquisas Hidráulicas - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2001. 194p.

CRUZ, E. S. Estudos dos impactos do uso do solo através da modelagem da geração do escoamento superficial e erosão do solo na região do Cariri Paraibano. Dissertação de Mestrado. PPGEC/CCT/UFCG- Campina Grande, 2004. 195 p.

DARONCO, G.C. Avaliação dos parâmetros do modelo Kineros 2 para simulação hidrossedimentológica em duas pequenas bacias hidrográficas. Santa Maria-RS, 2008. 120p. Dissertação (Engenharia Civil e Ambiental, na área de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Universidade Federal de Santa Maria.

EHLERS, W. Transpiration efficiency of oat. *Agronomy Journal*, Madison, v.81, p.810-817. 1989.

ENGELUND, F. e HANSEN, E. A Monograph on Sediment Transport in Alluvial Streams. Teknisk Forlag, Copenhagen, 1967.

ERSKINE, W. D.; MAHMOUDZADEH, A. & MYERS, C. Land use effects on sediment yields and soil loss rates in small basins of triassic sandstone near sydney, nsw, australia. *Catena*. v.49, p.271-287, 2002.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Manual de métodos de análises de solos. Rio de Janeiro – RJ, 1997. 121p.

FAO. La erosión del suelo por el agua. Algunas medidas para combatirla en las tierras decultivo. Cuadernos de fomento agropecuario da Organizazción. de las Naciones Unidas – FAO, Roma, n. 81, 1967. 207 p.

FIGUEIREDO, E. E. Estimativa de Parâmetros Físicos do Solo da Bacia Representativa de Sumé com Base na Textura. Anais em CDROM do IV Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste, Campina Grande, Paraíba, ABRH, 1998.

FLANAGAN, D.C. e NEARING, M.A. 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, 1995.

FOSTER, G. R. 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, 1982.

GALVÃO, C. O. Modelagem do Escoamento Superficial e da Erosão do Solo em Microbacias. Dissertação de mestrado, DEC/CCT/UFPB, 1990.

GUERRA, A.J.T. Experimentos e monitoramentos em erosão dos solos. Revista do Departamento de Geografia, 16, p. 32-37. 32, 2005.

GREEN, W. H. & AMPT, G. A. Studies on Soil Physics, 1. The Flow of Air and Water Through Soils. Journal of Agricultural Science, v.4, n.1, p.1-24, 1911.

HORTON, R. E. The Role of Infiltration in the Hydrologic Cycle. American Geophysical Union, v. 14, p. 446-460, 1933.

KALIN, L.; GOVINDARAJU, R.S.; HANTUSH, M.M. Effect of geomorphologic resolution on modeling of runoff hydrograph and sedimentograph over small watersheds, Journal of Hydrology, v. 276. p. 89-111. 2003.

KNISEL, W.G. CREAMS: A Field Scale Model for Chemicals, Runoff, and Erosion from Agricultural Management Systems. Washington: USDA Conservation, Research Report, 26, 1980. 89p

LEPRUN, J. C. A erosão, a conservação e manejo do solo no Nordeste Brasileiro: balanço, diagnóstico e novas linhas de pesquisa. Recife, SUDENE/ORSTOM, 1981. 107 p.

LOPES, V. L.; & H. E. CANFIELD. Effects of watershed representation on runoff and sediment-yield modeling, *Journal of the American Water Resources Association*, v.40, p.311 – 319, 2004.

LOPES, W. T.A. Efeito de Escala na Modelagem Hidrossedimentológica na Região Semi-Árida da Paraíba. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Campina Grande, 2003. 174p.

LOPES, W.T.A. Efeitos de escala na modelagem hidrossedimentológica na região semi-árida da Paraíba. PPGEC/CCT/UFCG, Campina Grande, 2002. 174 p.

LOPES, V. L. e LANE, L. J. Um modelo computacional de simulação hidrológica. In: *Anais do VII Simpósio Brasileiro de Hidrologia e Recursos Hídricos*, Salvador, ABRH, Vol. 2, p.481-494, 1987.

MACHADO, R. E.; VETTORAZZI, C. A.; CRUCIANI, D. E. Simulação de escoamento em uma microbacia hidrográfica utilizando técnicas de modelagem e geoprocessamento. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v.8, n.1, p.147-155, 2003.

MARTÍNEZ-CARRERAS,N.;SOLER,M.;HERNÁNDEZ,E.;GALLART,F. Simulating badland erosion with KINEROS2 in a small Mediterranean mountain basin (Vallcebre, Eastern Pyrenees). *Catena* 71, p.145-154, 2007.

MELO FILHO, J. F.; SOUZA A. L. V. O manejo e a conservação do solo no Semi-árido baiano: desafios para a sustentabilidade. *Bahia Agríc.* v. 7, n. 3, 2006. 11p.

MENEZES, H. E. A.; BRITO, J. I. B.; LIMA, R. A. F. A. Veranico e a produção agrícola no Estado da Paraíba, Brasil. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.14, n.2, p.181-186, 2010.

MEYER, L.D.E.; WISCHMEIER, W.H. Mathematical Simulation of the Process of Soil Erosion by Water. *Transactions of the ASAE*, v. 12, n. 6, p. 754–758, 1969.

MINELLA, J.P.G.; MERTEN, G.H.; REICHERT, J.M.; CASSOL, E.A. Processos e modelagem da erosão da parcela à bacia hidrográfica. In: PRADO, R.B.; TURETTA, A.P.D.; ANDRADE, A.G. Manejo e conservação do solo e da água no contexto das mudanças ambientais. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2010. 486p.

MOLINIER, M.; AUDRY, P.; DESCONNETS, J. C. e LEPRUN, J. C. Dinâmica da Água e das Matérias em um Ecossistema Representativo do Nordeste Brasileiro. Condições de Extrapolação Espacial na Escala Regional. Relatório de andamento dos trabalhos. ORSTOM, Recife, 1989.

MONTENEGRO, A.A.A.; NASCIMENTO, J.; CORREA, M.M.; SILVA, V.P.; MOURA, R.F.; RIBEIRO, M.R.; MONTENEGRO, S.M.G.L; SANTOS, T.E.M. Implantação e Monitoramento da Bacia Experimental do riacho Jatobá. In: Anais do VII Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste. São Luis, Anais..., 2004.

MONTENEGRO, A.A.A.; MONTENEGRO, S.M.G.L. Variabilidade espacial de classes de textura, salinidade e condutividade hidráulica de solos em planície aluvial. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola*, v.10, n.1, p.30–37, 2006.

NASH, J.E., SUTCLIFFE, J.V., River flow forecasting through conceptual models Part I-A discussion of principles. *Journal of Hydrology* v. 10, n. 2, p. 282-290, 1970.

PADILHA, J. A. Base Zero Ano 2000: mudança de paradigma na produção agroambiental nos trópicos secos. In: Pedro Sisnado Leite et al. (orgs.). *Reforma agrária e desenvolvimento sustentável*. Brasília, Ministério do Desenvolvimento Agrário/NEAD. 2000.

PAIVA, F. M. de L. 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, 2008. 208p.

PARLANGE, J.Y.; LISLE, I.; BRADDOCK, R.D.; SMITH, R.E. The three-parameter infiltration equation. *Soil Science*, v.133, n. 6, p. 337–341, 1982.

PHILIP, J. R. The Theory of Infiltration: 1. The Infiltration Equation and its Solution, *Soil Science*. V. 83, n. 5, p. 345-357, 1957.

PHILIP, J. R. The Theory of Infiltration. In: *Advances in Hydrosience*. Ven Te Chow (Editor), V. 5, p. 215-296, 1969.

PLUS, M. BOURAOTTI, F., ZALDIVAR, M., MURRAY, C.N. Modelling the thau Lagoon Watershed (South Mediterranean Coast of France). 2003

PRUSKI, F.F.; RODRIGUES, L.N.; SILVA, D.D. Modelo hidrológico para estimativa do escoamento superficial em áreas agrícolas. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 5, n. 2, p. 301-307, 2001.

RAWLS, W.J.; GISH, T.J. & BRAKENSIEK, D.L. Estimating soil water retention from soil physical properties and characteristics. *Adv. Soil Sci.*, 16:213-234, 1991.

RAWLS, W.J. e SAXTON, K.E. Estimation of Soil Water Properties. *Transactions of the ASAE*, v. 25, n. 5, p. 1316-1320 and 1328, 1982.

RIBEIRO, M. R.; CORRÊA, M. M. Levantamento detalhado de solos da Fazenda Nossa Senhora do Rosário. In: MONTENEGRO, A. A. A. Diagnóstico e controle da salinização em aluviões com pequena agricultura irrigada. Recife: UFRPE, 2001. Relatório de Projeto CNPq- Programa Nordeste, processo número 521224/98-5.

ROVEY, E. W., WOOLHISER, D.A.; & SMITH, R. E. A distributed kinematic model of upland watersheds. Fort Collins, Colorado State University,. *Hydrologic Papers* 93, 1977. 52p

SALVIANO, A. A. C.; VIEIRA, S. R.; SPAROVEK, G. Variabilidade espacial de atributos de solo e de *Crotalaria Juncea* L. em área severamente erodida. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 22, p. 115-122, 1998.

SANTOS, T.E.M.; MONTENEGRO, A.A.; SILVA, V.P.; MONTENEGRO, S.M.G.L. Erosão hídrica e perda de carbono orgânico em diferentes tipos de cobertura de solo no semi-árido, em condições de chuva simulada, *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v.12, p.1-15, 2008.

SANTOS, L.L. Modelagem hidrossedimentológica e avaliação comparativa de três modelos em pequenas sub-bacias na região semi-árida paraibana. Campina Grande-PB, 2008. 263p. Dissertação (Engenharia Civil e Ambiental, na área de Engenharia de Recursos Hídricos) - Universidade Federal de Campina Grande.



SANTOS, T.E.M.; MONTENEGRO, A.A.; MATTOS, I.P.; ALBUQUERQUE, C.G. Perda de solo em resposta à erosividade da chuva na bacia experimental do Jatobá, Pesqueira-PE, IX Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste, 2008, Salvador.

SANTOS, C. A. G.; SILVA, R. M; AGUIAR L. M. C. Estimativa da produção de sedimentos na bacia experimental jatobá a partir de técnicas de modelagem e geoprocessamento. In Anais XVII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2007.

SANTOS, T. E. M., Avaliação de técnicas de conservação de água e solo em bacia experimental do semi-árido pernambucano. Recife, dezembro, 2006. 69p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal Rural de Pernambuco.

SANTOS, C. A. G.; PAIVA, F. M. L.; SILVA, R. M. Modelagem Hidrossedimentológica para as Parcelas da Bacia Experimental de São João do Cariri. VI Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste, São Luís, Maranhão, 2004.

SANTOS, C. A. G.; SUZUKI, K.; LOPES, W. T. A. Sediment yield in Ishite watershed using a runoff-erosion kinematic model. XXIX IAHR Congress, Beijing, China, p. 146-151, 2001.

SANTOS, C. A. G. Application of Runoff-Erosion Model for a Semiarid Area in Brazil. Ph.D Thesis, Ehime University, Japan, 1997.

SANTOS, C. A. G. Runoff-erosion Process Modeling and Determination of Model Parameters. M.Sc. Dissertation, Department of Civil Engineering, Ehime University. Japan, 1994.

SEIXAS, M. G.; SILVA, R. M. S.; SANTOS, C. A. G. Modelagem hidrossedimentológica no semi-árido de Pernambuco. João Pessoa-PB, abril, 2007. 24p. Relatório Técnico de Pesquisa – MCT/CT- HIDRO/CNPq.

SILVA JUNIOR, V. P. Investigação do escoamento e produção de sedimentos em bacia representativa do semi-árido para suporte à gestão dos recursos hídricos e produção agrícola. Projeto de dissertação de mestrado, Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife-PE, 2009.

SILVA, L. L.; COSTA, R. F.; CAMPOS, J. H. B. C.; DANTAS, R. T. Influência das precipitações na produtividade agrícola no Estado da Paraíba. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.13, n.4, p.454–461, 2009.

SILVA, R.M.; SANTOS, C.A.G. Estimativa da produção de sedimentos mediante uso de um modelo hidrossedimentológico acoplado a um SIG. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental v.12, n.5, p. 520-526, 2008.

SILVA, R.M. Previsão hidrossedimentologica numa bacia periurbana através do acoplamento de modelos climáticos e hidrológicos. João Pessoa: PB, (Dissertação de Mestrado, PPGEU/CT/UFPB), 2005.

SILVA, A.M.; SCHULZ, H.E.; CAMARGO, P.B. Erosão e hidrossedimentologia embacias hidrográficas. São Carlos: Rima, 2003.

SIMONS, D. B. e SENTÜRK, F. Sediment transport technology. Fort Collins, Water Resources Publications, 1992. 807p.

SMITH, R. E.; CORRADINI, C.; MELONE, F. Modeling infiltration for multistorm runoff events. *Water Resources Research*, v.29, n.1, p.133-144, 1993.

SMITH, R. E. E PARLANGE, J. Y. A Parameter-Efficient Hydrologic Infiltration Model. *Water Resources Research*, v. 14, n.3, p. 533-538, 1978.

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. 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. p. 93-126, 2004.

SRINIVASAN, V. S. e GALVÃO, C. O. Bacia Experimental de Sumé: Descrição e dados coletados. Campina Grande-PB: UFCG/CNPq, v. 1, 2003. 129 p.

TUCCI, C. E. M. *Hidrologia: Ciência e Aplicação*. Organizado por Carlos E. M. Tucci. Porto Alegre: Ed. da UFRGS/ABRH/EDUSP, Porto Alegre, 1993. 94p.

TUCCI, C. E. M. *Modelos hidrológicos*, Ed. Universidade /UFRGS/Associação Brasileira de Recursos Hídricos, Porto Alegre, 1998. 668p.

TUCCI, C. E. M. *Modelos Hidrológicos*. 2º. ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS ABRH GWP, v. 1. 2005. 678 p.

VANONI, V.A. (Ed.) *Sedimentation Engineering*. American Society of Civil Engineers Manual and Report of Engineering Practice n.54. 1975.

WOOLHISER, D. A., SMITH, R. E. e GOODRICH, D. C. KINEROS: A Kinematic Runoff and Erosion Model: Documentation and User Manual. U. S. Department of Agriculture, Agricultural Research Service, ARS-77, 1990. 130p.