

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO EM RECURSOS HÍDRICOS

Tese de doutorado

**AVALIAÇÃO DO PADRÃO DE DISTRIBUIÇÃO ESPAÇO-
TEMPORAL DOS PROCESSOS DE MOBILIZAÇÃO E DEPÓSITO
DE SEDIMENTOS**

ORIENTADORA: Suzana Maria de Lima Gico Montenegro

CO-ORIENTADOR: Ignacio Hernan Salcedo

DOUTORANDA: Fernanda Maria de Lima Paiva

Recife, PE

Fevereiro de 2012.

FERNANDA MARIA DE LIMA PAIVA

**AVALIAÇÃO DO PADRÃO DE DISTRIBUIÇÃO ESPAÇO-
TEMPORAL DOS PROCESSOS DE MOBILIZAÇÃO E DEPÓSITO
DE SEDIMENTOS**

Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação de Engenharia Civil do Departamento de Engenharia Civil, para obtenção do título de Doutor em Engenharia Civil. Área de Concentração: Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos.

ORIENTADORA: Suzana Maria de Lima Gico Montenegro

CO-ORIENTADOR: Ignacio Hernan Salcedo

Recife, PE

Fevereiro de 2012.

- P149a Paiva, Fernanda Maria de Lima.
Avaliação do padrão de distribuição espaço-temporal dos processos de mobilização e depósito de sedimentos. / Fernanda Maria de Lima Paiva. – Recife: O Autor, 2012.
xv, 110f., il., figs., gráfs., tabs.
- Orientadora: Prof^a. Suzana Maria de L. Gico Montenegro, Ph.D.
Co-Orientador: Prof. Ignacio Hernan Salcedo, Ph.D.
Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG.
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2012.
Inclui Referências.
1. Engenharia Civil. 2. Sedimentos. 3. Modelo Hidrossedimentológico.
4. Traçador Radioativo. I. Montenegro, Suzana Maria de Lima Gico (Orientadora). II. Salcedo, Ignacio Hernan (Co-Orientador) III. Título.

AVALIAÇÃO DO PADRÃO DE DISTRIBUIÇÃO ESPAÇO-TEMPORAL DOS PROCESSOS DE MOBILIZAÇÃO E DEPÓSITO DE SEDIMENTOS

Fernanda Maria de Lima Paiva

Tese de doutorado submetido ao corpo docente do Programa de Pós-Graduação da Universidade Federal da Pernambuco como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Doutor em Ciências em Engenharia Civil.

Banca Examinadora:

Prof. ^(a). Phd. Suzana M. L. Gico Montenegro – UFPE (DEC)

Prof. Phd. Ignacio Hernan Salcedo – (INSA)

Prof. Dr. Alfredo Ribeiro Neto – UFPE (DEC)

Prof. Dr. José Araújo dos Santos Júnior – UFPE (DEN)

Prof. Dr. Ricardo de Aragão – UFS (DEC)

Prof. Phd. José Roberto Azevedo – UFPE (DEC)

Recife, PE

Fevereiro de 2012.

EPÍGRAFE

“O saber é saber que nada se sabe e sempre se está em eterno aprendizado.

Esta é a definição do verdadeiro conhecimento.”

Confúncio

DEDICATÓRIA

A Deus, pela presença constante em todos os momentos da minha vida, aos meus amados

Pais, Ana Maria e Fernando Paiva, ao meu amor George e aos meus irmãos Flávio e Fernando pelo amor, dedicação, apoio e companheirismo, e ao Prof. Srinivasan, pelo total apoio e amizade incondicionais.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por ter permitido mais esta vitória em minha vida.. 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 amados pais, Ana Maria de Lima Paiva e Fernando Paiva, 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. Pessoas que sempre foram e serão exemplos de união, força, honestidade e principalmente de muito amor. E aos meus irmãos, Flávio José de Lima Paiva e Fernando Paiva Jr., pelo compartilhamento de tristezas e alegrias.

Ao meu amor, George Carlos Pereira, pelo 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.

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

Ao professor colaborador e amigo Vajapeyam S. Srinivasan, por usufruir de sua vasta experiência e sabedoria, numa orientação segura e precisa, em todos os momentos e por sua total paciência e compreensão das minhas inúmeras limitações durante a jornada rumo à conclusão deste trabalho e por toda sua orientação e norteamento durante toda minha vida acadêmica. Professor este que me transmitiu valiosos ensinamentos que levarei comigo durante toda minha vida. Me sinto muito honrada de dizer que ele foi e sempre será meu orientador. Minha eterna gratidão por tudo!

A professora orientadora Suzana Maria de Lima Gico Montenegro por acreditar no meu trabalho, aceitando minha proposta de trabalho, sempre me orientando de forma a tirar de mim sempre o melhor possível em prol de um trabalho de qualidade.

Ao professor co-orientador Ignacio Hernan Salcedo, pela infinita ajuda, amizade, paciência e entendimento de minhas limitações e por sua orientação segura e de forma clara, que ajudaram de forma substancial o termino deste trabalho.

Em especial ao Professor Paulo Frassinete de Araújo Filho, grande organizador do trabalho de campo, sem sua grande ajuda e experiência de campo, o trabalho não teria sido realizado de forma tão coerente, mesmo tendo que superar inúmeros percalços ao longo do desenvolvimento do trabalho. Só nós sabemos o quanto foi difícil! Logo em palavras não posso exprimir toda minha gratidão, tudo que posso dizer é muito obrigada por tudo. Pra mim eis um grande exemplo de pesquisador!

Ao Prof. Alfredo Ribeiro Neto e ao Prof. Jaime Cabral, pela ajuda financeira para darmos continuidade aos trabalhos de campo numa época que quase pensamos desistir por falta de recursos.

Ao professor José Roberto Gonçalves de Azevedo, pelo nosso trabalho em parceria de coleta e tratamento dos dados coletados na Bacia Experimental Riacho Gameleira.

E aos professores da Pós-Graduação de Engenharia Civil, da área de Recursos Hídricos: Alfredo Ribeiro Neto, Jaime Joaquim da Silva Cabral, José Almir Cirilo, José Roberto Azevedo e Ricardo Augusto Braga, pelos conselhos, apoio e norteamento em momentos de incerteza e insegurança.

Ao Engenheiro do Laboratório de Recursos Hídricos, Lopes, pelo árduo trabalho de campo realizado em parceria. Pessoa esta que nunca se negou a me ajudar mesmo nos trabalhos mais laboriosos e fora das suas atribuições. E a secretária do curso de pós-graduação de Engenharia Civil, minha amiga Andréa Negromonte, que buscou sempre ajudar em todos os momentos. E aos demais funcionários e alunos do Laboratório de Recursos Hídricos da UFPE.

Aos grandes amigos de todas as horas, Richarde Marques da Silva e Leonardo Pereira e Silva pela amizade e ajuda mutua durante todos os trabalhos da tese.

Aos avaliadores Alfredo Ribeiro Neto, José Araújo dos Santos Júnior, José Roberto Gonçalves de Azevedo e Ricardo Aragão pelas importantes contribuições para a melhoria deste trabalho, e total ajuda, apoio e disponibilidade durante todo o desenvolvimento do mesmo.

Ao laboratório de Energia Nuclear e laboratório de Fertilidade do solo os dois localizados na UFPE, que nos deram a oportunidade de realizar todas as análises necessárias para a conclusão desta tese. Meu agradecimento a todos os professores,

técnicos, funcionários e alunos destes dois laboratórios que nos ajudaram com tanta presteza e atenção.

Ao projeto BEER-FINEP/CTHidro pelo financiamento do projeto de pesquisa.

A FACEPE pela concessão da bolsa de doutorado, dando o apoio financeiro, o qual possibilitou a conclusão desta tese.

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

RESUMO

A Produção de sedimentos hídrica é um agente primário da degradação ambiental, e provoca redução da capacidade de reservatórios, intensificação do transporte de poluentes agregados às partículas de sedimentos e diminuição da produção agropecuária, devido à perda da capacidade produtiva dos solos. Este estudo foi realizado em um curso d'água perene da Microbacia Experimental do Riacho Gameleira, localizada no município de Vitória de Santo Antão – PE. Este estudo teve como objetivo estudar os padrões espaçotemporais da produção de sedimentos, utilizando uma fossa de sedimentação, traçador radioativo (^7Be), modelo matemático de predição da produção de sedimentos e analisar as concentrações de nutrientes do solo, quanto aos teores de carbono (C), potássio (K) e fósforo (P), depositados na fossa de sedimentação. Foram instalados na seção hidrossedimentométrica no exutório da microbacia, dois dispositivos para medição de sedimentos, um em suspensão e outro de arrasto, que registraram um total de 50 eventos de produção de sedimentos, em 2010 e 2011. A produção média de sedimentos na microbacia foi estimada em $7,33 \text{ ton.ha}^{-1}.\text{ano}^{-1}$. As perdas de totais de C, K e P registrados nas amostras de solos na área de estudo foram $7,4 \text{ g.kg}^{-1}$, $2,6 \text{ g.kg}^{-1}$ e $0,8 \text{ g.kg}^{-1}$, respectivamente. Pelos resultados dessa pesquisa, o uso do ^7Be para estudo de Produção de sedimentos para Bacias do nordeste brasileiro não se mostra viável em virtude da baixa atividade deste isótopo nestes solos.

Palavras-chave: sedimentos, modelo hidrossedimentológico, traçador radioativo.

ABSTRACT

Water erosion is a primary agent of environmental degradation, and causes a reduction in reservoir storage, increase in the transport of pollutants added to the sediment particles, decreased agricultural yield due to loss of the soils productive capacity. This study aimed to analyse the spatio-temporal patterns of sediment yield using a sedimentation pit, radioactive tracer (^7Be) and numerical modeling for predicting sediment yield and analyze soil nutrient concentrations, for concentrations of carbon (C), potassium (K) and phosphorus (P), and sediment deposited in the pit. This study was conducted in a perennial stream of Gameleira Creek Experimental Basis, located in Vitoria de Santo Antao -PE. Experimental devices were installed in the outlet section of the watershed for measurements of variables related to the rainfall-runoff-erosion model, two devices for measuring sediment in suspension and another one for deposition values, which recorded a total of 50 events of sediment production during 2010 and 2011 time period. The average production of sediment in the watershed was estimated as 7.33 ton.ha^{-1} year. The total losses of C, P and K recorded in soil samples in the study area were 7.4 g.kg^{-1} , 2.6 g.kg^{-1} and 0.8 g.kg^{-1} , respectively. The use of ^7Be at the experimental watersheds in northeastern Brazil showed to be unfeasible due to the low activity of this isotope in these soils.

Key-words: *sediment, rainfall-runoff-erosion model, radioactive tracer.*

SUMÁRIO

1.0. UMA BREVE INTRODUÇÃO	01
1.1. Processos físicos: erosão, desertificação e degradação do solo	01
1.2. Necessidades de estudos experimentais e de modelagem	02
1.3. Estudos em bacias experimentais	05
1.4. Análise das concentrações dos nutrientes do solo	06
1.5. Utilização de isótopos radioativos como traçadores de erosão	07
1.6. Objetivos	08
1.6.1. Objetivo geral	08
1.6.2. Objetivos específicos	09
1.7. Organização da tese	09
2.0. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	10
2.1. Considerações gerais	10
2.2. Medidas diretas em uma fossa de sedimentação	12
2.3. Análise dos teores de carbono, potássio e fósforo nos sedimentos	14
2.4. Modelagem hidrossedimentológica	16
2.4.1 Classificação dos modelos hidrológicos	16
2.5. O uso dos isótopos traçadores em estudos de sedimentologia	20
3.0. ÁREA DOS ESTUDOS	24
3.1. Área experimental	24
3.2. Monitoramento na fossa de sedimentação	29
3.2.1. Dispositivos para medições de precipitação, nível de d'água	29
3.2.2. Fossa de sedimentação para medição de sedimentos de arrasto e suspensão	30
3.2.2.1. Análise dos Dados em Laboratório	34

3.2.2.2. Determinação da Curva-Chave de Vazão	35
3.2.2.3. Determinação da Produção de Sedimentos em Suspensão	36
3.3. Análise dos teores de carbono (C), fósforo (P) e potássio (K) nos sedimentos colhidos na fossa de sedimentação	37
3.4. Modelagem hidrossedimentológica	37
3.4.1. Uma descrição geral do Modelo KINEROS2	40
3.5. Aplicação da técnica de isótopos traçadores para quantificar a produção de sedimentos em uma encosta	48
3.5.1. Construção do amostrador e um fatiador de solo, aquisição e preparo das amostras de solo	48
3.5.2. Determinação no laboratório da concentração de ^{7}Be no solo	51
3.5.2.1. Sistema de medidas	51
3.5.2.2. Eficiências de contagens dos padrões	52
4.0. RESULTADOS OBTIDOS	56
4.1. Aquisição de dados de produção de sedimentos	56
4.1.1. Estabelecimento da curva chave de Vertedouro	56
4.1.2. Produção de sedimentos em suspensão e arrasto	57
4.2. Modelagem hidrossedimentológica da microbacia	67
4.2.1. Discretização	67
4.2.2. Modelagem	68
4.2.2.1. Calibração	69
4.2.2.2. Previsão da lâmina escoada sem calibração da saturação Inicial	71
4.2.2.3. Simulação com os parâmetros médios	75
4.2.2.4. Validação	77
4.2.2.5. Simulação com os parâmetros médios regionais	80

4.3. Perdas de nutrientes no solo_____	84
4.4. Aplicação do método de isótopo traçador ^7Be _____	88
4.4.1.Dados de ^7Be em uma encosta da Bacia Experimental Riacho Gameleira_____	88
4.5. Comparação das três técnicas aplicadas no estudo_____	93
5.0. CONSIDERAÇÕES GERAIS_____	94
5.1.Conclusões_____	96
5.2.Recomendações _____	96
6.0. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS_____	98

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Esquema da fossa de sedimentação utilizada na BES e BESJC. (Cadier et al., 1983)	14
Figura 2. Localização da Microbacia Experimental estudada dentro Bacia Experimental do Riacho Gameleira	24
Figura 3. (a) Mapa de uso e ocupação do solo da BERG e (b) Mapa dos tipos de solo e localização da área de contribuição da seção hidrossedimentométrica	25
Figura 4. (a) Mapa de uso e ocupação do solo da BERG	26
Figura 5. Modelo digital de elevação da Bacia Experimental do Riacho Gameleira	26
Figura 6. Precipitação média mensal entre 2010 e 2011 na Bacia Experimental do Riacho Gameleira	28
Figura 7. Instalação do sensor de Ultra-som	29
Figura 8. Instalação do sensor de nível	30
Figura 9. Fossa de sedimentação pronta para receber os eventos	31
Figura 10. Fossa de sedimentação com acúmulo de sedimentos, após um evento de precipitação médio	31
Figura 11. Fossa de sedimentação com grande acúmulo de sedimentos	32
Figura 12. Medição da fossa de sedimentação	33
Figura 13. Fossa de sedimentação e detalhes do coletor de sedimentos em suspensão: (A) Chapa galvanizada que evita entrada de sedimento no canal. (B) Garrafas coletoras de sedimentos para coleta das amostras	34
Figura 14. Amostrador de solo	49
Figura 15. Fatiador de solo	49
Figura 16. Fatiador do solo	50
Figura 17. Execução do fatiamento do solo	50
Figura 18. Sistema de medidas. (1-Recipiente para N ₂ (l); 2-Haste de Cu para resfriamento do HPGe; 3-Detector HPGe; 4-Amostra em recipiente de polietileno; 5-Blindagem de Pb;	

6-Mangueira para transferência de $N_2(l)$; 7-Suporte da blindagem de Pb; 8-Alimentador de $N_2(l)$; 9-Alta voltagem do pré-amplificador; 10-Pré-amplificador; 11-Amplificador; 12-ADC; 13-MCA; 14-Sistema computacional)	52
Figura 19. Espectro gama para amostra de solo (camada superficial de 2 mm do topo da encosta)	53
Figura 20. Curva-chave do posto hidrossedimentométrico no Riacho Gameleira	57
Figura 21. Relação obtida entre as vazões e as descargas sólidas em suspensão média para cada evento registrado na microbacia	65
Figura 22. A concentração de sedimentos e a vazão observada em cada evento registrado na microbacia	66
Figura 23. Discretização da microbacia	68
Figura 24. Comparação entre a produção de sedimentos observada e calculada	71
Figura 25. Estudo da variação da saturação do solo no evento 1	72
Figura 26. Estudo da variação da saturação do solo no evento 2	73
Figura 27. Estudo da variação da saturação do solo no evento 3	73
Figura 28. Estudo da variação da saturação do solo no evento 4	73
Figura 29. Estudo da variação da saturação do solo no evento 5	74
Figura 30. Estudo da variação da saturação do solo no evento 6	74
Figura 31. Estudo da variação da saturação do solo no evento 7	74
Figura 32. Comparação entre a produção de sedimentos observada e calculada	80
Figura 33. Comparação entre a produção de sedimentos observada e calculada	84
Figura 34. Concentração de nutrientes (C, P e K) nos sedimentos amostrados na caixa de sedimentação da microbacia experimental do Riacho Gameleira 2010	86
Figura 35. Concentração de nutrientes (C, P e K) nos sedimentos amostrados na caixa de sedimentação da microbacia experimental do Riacho Gameleira 2011	86
Figura 36. Precipitação ocorrida um dia antes da coleta do solo para análise de 7Be 2010	89
Figura 37. Precipitação ocorrida um dia antes da coleta do solo para análise de 7Be 2010	89
Figura 38. Perfil de distribuição vertical do 7Be na área de referência 2010	91

Figura 39. Perfil de distribuição vertical do ^7Be na área de referência 2011_____92

Figura 40. Perfil de distribuição vertical do ^7Be na área de referência _____92

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Principais características da Microbacia Experimental do Riacho Gameleira_____	27
Tabela 2. Parâmetros físicos do solo, utilizados pelo modelo KINEROS2 para a microbacia da Bacia Experimental Riacho Gameleira_____	38
Tabela 3. Valores de precipitação e produção de sedimentos estimada na microbacia da BERG_____	58
Tabela 3. Continuação dos valores de precipitação e produção de sedimentos estimada na microbacia da BERG_____	59
Tabela 4. Valores de precipitação total, lâmina escoada, concentração de sedimentos em suspensão, e produção de sedimentos estimada na microbacia da BERG_____	59
Tabela 4. Continuação dos valores de precipitação total, lâmina escoada, concentração de sedimentos em suspensão, e produção de sedimentos estimada na microbacia da BERG_____	60
Tabela 4. Continuação dos valores de precipitação total, lâmina escoada, concentração de sedimentos em suspensão, e produção de sedimentos estimada na microbacia da BERG_____	61
Tabela 4. Continuação dos valores de precipitação total, lâmina escoada, concentração de sedimentos em suspensão, e produção de sedimentos estimada na microbacia da BERG_____	62
Tabela 4. Continuação dos valores de precipitação total, lâmina escoada, concentração de sedimentos em suspensão, e produção de sedimentos estimada na microbacia da BERG_____	63
Tabela 5. Calibração dos dados do inverno de 2010 na Bacia Experimental Riacho Gameleira_____	70
Tabela 6. Eventos típicos, para representar eventos com baixa, média e grande produção de sedimentos_____	71
Tabela 7. Simulação com os parâmetros médios calibrados: $S_i = 0,32$ - $cf = 4780977,136$ - Co (plano) = $0,01$ - co (canais) = $0,0001$, utilizando os dados coletados em 2010_____	76
Tabela 8. Validação com os parâmetros médios calibrados: $splash = 4780977,136$ - Co (plano) = $0,01$ - Co (canais) = $0,0001$ _____	78

Tabela 8. Continuação da validação com os parâmetros médios calibrados: $cf = 4780977,136$ - co (plano) = 0,01 - co (canais) = 0,0001_____79

Tabela 9. Simulação com os parâmetros médios regionais calibrados: $Si = 0,32$, splash = 8×105 , - Co (plano) = 0,01 - Co (canais) = 0,00001, $Ks = 3,75$ mm/h, $G = 295$, $Ro = 0,1$, $Sp = 0,3$ m, $In = 0,76$, $C = 1,0$, $n = 0,072$ _____82

Tabela 9. Continuação da Simulação com os parâmetros médios regionais calibrados: $Si = 0,32$, $cf = 8 \times 105$, - co (plano) = 0,01 - co (canais) = 0,00001, $Ks = 3,75$ mm/h, $G = 295$, $Ro = 0,1$, $Sp = 0,3$ m, $In = 0,76$, $C = 1,0$, $n = 0,072$ _____83

Tabela 10. Concentrações de carbono, fósforo e potássio totais nas amostras de sedimentos da microbacia da Bacia Experimental do Riacho Gameleira_____84

Tabela 10. Continuação das concentrações de carbono, fósforo e potássio totais nas amostras de sedimentos da microbacia da Bacia Experimental do Riacho Gameleira____85

Tabela 11. Valores experimentais médios de profundidade mássica, atividade mássica e de área de 7Be , determinados em amostras retiradas em camadas sequenciais de 2 mm de espessura, em três posições do relevo, após chuvas intensas nos anos de 2010 e 2011 ($n = 3$ e $n = 5$ para 2010 e 2011, respectivamente)_____90

Tabela 11. Continuação dos valores experimentais médios de profundidade mássica, atividade mássica e de área de 7Be , determinados em amostras retiradas em camadas sequenciais de 2 mm de espessura, em três posições do relevo, após chuvas intensas nos anos de 2010 e 2011 ($n = 3$ e $n = 5$ para 2010 e 2011, respectivamente)_____91

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Área de seção transversal do fluxo (L^2)
a	Coeficiente na relação entre vazão e profundidade do fluxo ou entre vazão e área da seção transversal do canal
B	Combinado dos efeitos do potencial efetivo de capilaridade, profundidade do fluxo e armazenamento de água do solo
C_D	Coeficiente de arrasto
C_r	fator que considera a cobertura existente no plano
C_u	Indicador do ponto de empoçamento (L)
cf	Coeficiente na equação de erosão devido ao impacto das gotas de chuva
c_g	Coeficiente da taxa de transferência na erosão/deposição hidráulica (T^{-1})
ch	Coeficiente de amortecimento devido à lâmina d'água na equação de erosão por impacto das gotas de chuva
$C(x)$	Atividade do 7Be no solo ($A.L^{-2}$)
$C(0)$	Atividade do 7Be no solo no ponto inicial ($A.L^{-2}$)
C_m	Concentração de equilíbrio na capacidade de transporte de sedimentos ($L^3.L^{-3}$)
C_{ss}	Concentração de sedimentos ($M.L^{-1}$)
c_o	Coeficiente relacionado à coesão do solo
C_S	Concentração de sedimentos
C_s	Concentração de sedimentos no fluxo ($L^3.L^{-3}$)
C_v	Coeficiente de variação da condutividade hidráulica efetiva do solo
d	Tamanho característico dos sedimentos (L)
d_i	Diâmetro efetivo da gota (L)
D_i	Taxa de erosão de sedimentos nas áreas planas ($M.T^{-1}.L^{-2}$)
D_r	Taxa de erosão de sedimentos nos canais ($M.T^{-1}.L^{-2}$)

d_{50}	Diâmetro médio dos sedimentos
e	Erosão calculada ($L^2.T^{-1}$)
e_h	Erosão devido ao arrasto pelo fluxo superficial ($L^2.T^{-1}$)
e_o	Erosão observada ($L^2.T^{-1}$)
e_s	Erosão devido ao impacto das gotas de chuva ($L^2.T^{-1}$)
E_c	Erosão calculada ($M.L^{-1}$)
E_o	Erosão observada ($M.L^{-1}$)
$E_{c/a}$	Energia cinética por unidade de área ($M.T^{-2}$)
$E_{c/v}$	Energia cinética por unidade de volume ($M.L^{-1}.T^{-2}$)
e	Erosão calculada ($L^2.T^{-1}$)
e_h	Erosão devido ao arrasto pelo fluxo superficial ($L^2.T^{-1}$)
e_o	Erosão observada ($L^2.T^{-1}$)
e_s	Erosão devido ao impacto das gotas de chuva ($L^2.T^{-1}$)
F	Profundidade acumulada de infiltração (L)
f_c	Taxa de infiltração ($L.T^{-1}$)
f_i	Índice médio de infiltração ($L.T^{-1}$)
f_c	Taxa de infiltração ($L.T^{-1}$)
G	Valor efetivo do potencial de capilaridade (L)
G_e	Parâmetro que considera o efeito da cobertura do solo para erosão
H	Profundidade do fluxo (L)
h	Volume de água armazenado por unidade de área (L)
I	Infiltração acumulada (L)
I_p	Intensidade de precipitação ($L.T^{-1}$)
K	Condutividade hidráulica do solo ($L.T^{-1}$)
K_s	Condutividade hidráulica saturada efetiva ($L.T^{-1}$)
L	Comprimento do plano (L)
L_c	Lâmina calculada (L)

L_o	Lâmina observada (L)
m	Expoente na relação entre vazão e profundidade do fluxo ou entre vazão e área da secção transversal do canal
n	Coefficiente de rugosidade de Manning
N_s	Parâmetro de sucção/umidade do solo (L)
n	Número de intervalos de diâmetro de gota
N_i	Número de gotas ou fração de chuva no intervalo de diâmetro de gotas d_i e caracterizada por um diâmetro efetivo d_i (L)
P	Fator efetivo de profundidade
q	Descarga por unidade de largura ($L^2.T^{-1}$)
Q	Vazão ($L^3.T^{-1}$)
Q_{ss}	Produção de sedimentos em suspensão ($M.L^{-1}.T^{-1}$)
Q_p	Vazão de Pico ($L^3.T^{-1}$)
q_p	Taxa de escoamento de pico em ($L^3.T^{-1}$)
q_s	Entrada lateral de sedimentos no canal ($L^3.T^{-1}.L^{-1}$)
R	Raio hidráulico (L)
r	Taxa de entrada de água na superfície do solo durante a redistribuição de água (LT^{-1})
r_e	Excesso de precipitação ($L.T^{-1}$)
R	Altura de chuva acumulada (L)
R_n	Número de Reynolds da partícula
r_b	Taxa de chuva média ($L.T^{-1}$)
r_e	Excesso de precipitação ($L.T^{-1}$)
S	Declividade
Sat	Saturação
S_f	Declividade da linha de energia
S_i	Saturação inicial relativa do solo
S_o	Declividade do plano ou do fundo do canal

S_s	Densidade relativa do sedimento
T_c	Capacidade de transporte de sedimentos pelo escoamento ($M.L^{-1}.T^{-1}$)
t	Tempo de precipitação (T)
t	Tempo (T)
t_p	Tempo de empoçamento (T)
T_w	Largura de topo do fluxo (L)
u	Velocidade média do fluxo ($L.T^{-1}$)
V	Volume de escoamento (L^3)
v	Velocidade média de impacto da gota de chuva ($L.T^{-1}$)
V_f	Velocidade de queda
v_i	Velocidade de impacto da gota de chuva ($L.T^{-1}$)
V_i	Excesso de chuva acumulado (L)
v_s	Velocidade de queda das partículas ($L.T^{-1}$)
W	Largura do plano (L)
X	Distância na direção do fluxo (L)
x	representa a massa de solo por unidade de área (M/L^{-2})
Y	Produção de Sedimento (M)
Z	Profundidade da frente de molhamento a partir da superfície (L)
α	Coeficiente da equação de Smith e Parlange (1978)
α	Tipo do solo
β	Fator de forma
δ	Coeficiente para a tensão de cisalhamento crítico (Pa)
$\Delta\theta$	Armazenamento de água no solo
$\Delta\theta_{io}$	Diferença de umidade do solo acima e abaixo da frente de molhamento
Δ_s	Umidade de saturação do solo (L^3/L^3)
γ_s	Peso específico da água ($M.L.T^{-2}.L^{-3}$)
γ_s	Peso específico dos sedimentos ($M.L.T^{-2}.L^{-3}$)

λ	Índice de distribuição dos tamanhos dos poros
η_e	Porosidade efetiva (L/L)
τ	Tensão de cisalhamento média ($M.L.T^{-2}.L^{-3}$)
ν	Viscosidade cinemática da água ($L^2.T^{-1}$)
V_p	Volume do padrão (M)
Ω	Potência unitária do fluxo ($L.T^{-1}$)
δ	Coeficiente para cálculo da tensão de cisalhamento crítica
ϕ	Porosidade efetiva
ψ	Potencial capilar médio (L)
τ	Tensão cisalhante atuando nas partículas de solo em decorrência do escoamento ($M.L^{-2}.T^{-1}$)
τ_c	Tensão de cisalhamento crítica ($M.L.T^{-2}.L^{-3}$)
τ_c	Tensão de cisalhamento crítica média ($M.L.T^{-2}.L^{-3}$)
ε_c	Coeficiente de deposição nos canais
ε_p	Coeficiente de deposição nos planos
θ	Umidade do solo no período de redistribuição de água
θ_d	Déficit de umidade do solo na mistura do solo (L/L)
θ_t	Umidade do solo abaixo da frente de molhamento
θ_o	Umidade do solo acima da frente de molhamento
θ_r	Umidade residual do solo
θ_s	Umidade do solo na saturação
θ_v	Conteúdo volumétrico inicial da água por unidade de área (L/L)
θ_i	Umidade inicial do solo
ρ_w	Massa específica da água, $M.L^{-3}$

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.0. UMA BREVE INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, o interesse por estudos de impactos ambientais causados pelas atividades humanas tem levado um considerável número de pesquisadores a estudar novas ferramentas, inclusive aquelas que buscam simular as transformações ocorridas através das mudanças no uso indiscriminado da água e do solo, levando em consideração a questão da distribuição espacial dentro da bacia em estudo (Santos et al., 2005).

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 de simulação de erosão e produção de sedimentos (Bandeira, 1998).

1.1. Processos físicos: erosão, desertificação e degradação do solo

A erosão é um dos problemas ambientais mais graves, sendo considerada uma das principais formas de degradação dos solos na região semi-árida. A erosão dos solos causa outros diversos problemas como: redução da capacidade de reservatórios, intensificação do transporte de poluentes agregados às partículas de sedimentos e o surgimento de ravinas ou voçorocas.

O desmatamento desordenado e atividades agrícolas inadequadas para o tipo de solo, sobretudo em áreas de relevo, são os principais fatores que contribuem para os

processos erosivos e podem causar a desertificação (Albuquerque et al, 2001; Fraga e Salcedo, 2004).

O estudo da desertificação tem se tornado uma questão de suma importância, preocupando ambientalistas em todo o mundo (Albuquerque et al, 2001), devido a perda da capacidade produtiva e a degradação das terras. Nas últimas décadas, o interesse por estudos de impactos ambientais causados pelas atividades antrópicas tem levado um considerável número de pesquisadores a estudar estes fenômenos e buscar novas ferramentas, para a simulação destes (Machado et al., 2010; Paiva, 2008; Santos et al., 2010; Santos et al., 2000). A simulação dos processos de escoamento superficial e erosão do solo considerando-se a questão da variabilidade espacial dos processos hidrológicos dentro da bacia em estudo tem sido o objeto de muitos estudos (Santos et al., 2000). Logo, quaisquer tentativas que tentam solucionar ou minimizar esta problemática da desertificação, devem se basear nos estudos sobre erosão e perda de solo.

1.2. Necessidades de estudos experimentais e de modelagem

A utilização dos modelos hidrossedimentológicos para a avaliação da erosão superficial em bacias é uma boa opção. No entanto, a já mencionada escassez de dados medidos de sedimentos, dificulta a calibração e validação dos modelos hidrossedimentológicos. Para solucionar esse problema, estudos em bacias experimentais com a coleta de dados principais como o escoamento superficial e a produção de sedimentos no seu exutório são indispensáveis. A coleta de produção de sedimentos em fossas de sedimentação, e a utilização de traçadores de isótopos radioativos, ajudam na quantificação da produção de sedimentos e a determinação das fontes destes sedimentos em bacias experimentais. A análise da distribuição espacial dos processos erosivos e da produção de sedimentos é de grande utilidade nos estudos sedimentológicos, 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). Além disso, estes estudos são as únicas

maneiras atualmente disponíveis para validar modelos distribuídos de erosão e produção de sedimentos (Lu et al., 2006).

No Estado de Pernambuco, assim como em outras regiões do nordeste, estudos sobre erosão dos solos são afetados pela carência ou mesmo ausência de dados primários. A erosão superficial em bacias hidrográficas ainda é um dos principais problemas enfrentados e sua avaliação pela aplicação de modelos hidrossedimentológicos necessita dados confiáveis.

A principal dificuldade encontrada em estudos dos processos hidrossedimentológicos diz respeito à escassez de séries longas de dados confiáveis (Araújo e Knight, 2005), que se deve principalmente a necessidade de investimentos, relativamente elevados, necessários para a implantação de uma rede sedimentométrica, e ao longo tempo para obter séries consistentes e representativas de dados.

Portanto, os modelos matemáticos que simulam os processos erosivos e de transporte de sedimentos ganham importância para a gestão de bacias hidrográficas, pois ajudam na estimativa do escoamento superficial e erosão. Além de poder estimar a produção de sedimentos em regiões não monitoradas, modelos hidrossedimentológicos têm a capacidade de simular os efeitos de modificações na bacia (uso do solo, por exemplo) nos processos erosivos, e estimar os padrões espaciais da produção de sedimentos em áreas com monitoramento restrito a poucas seções.

Nesse contexto, a modelagem dos processos sedimentológicos em bacias hidrográficas enfrenta um dilema que consiste na escolha entre abordagens bastante distintas, com resultados também diferenciados: I. Modelos simples (em geral empíricos, concentrados) capazes de indicar a produção de sedimentos total na escala de bacia, porém inadequados para a determinação de sua distribuição espacial; II. Modelos mais complexos (bases físicas, distribuídos) que permitem a previsão do padrão espacial da produção de sedimentos, simulando explicitamente as condições de transporte, mas que requerem uma grande quantidade de dados de entrada e apresentam incertezas quanto à simulação conjunta de diferentes processos e suas interações (Merritt et al., 2003). Além disso, o conhecimento dos efeitos da variação da cobertura vegetal e das características físicas do solo sobre o movimento de sedimentos e água é muito importante para a tomada de decisões acerca do manejo do solo (Kuhnle et al., 1996).

Assim, a modelagem dos processos de erosão do solo nas condições reais se torna um desafio e uma necessidade.

Uma das maneiras de se avaliar as influências do tipo de solo e da cobertura vegetal sobre os processos erosivos é a partir do emprego de modelos matemáticos. Esses modelos são ferramentas valiosas para simulação dos processos hidrossedimentológicos, desde que estejam adequadamente parametrizados. Atualmente, modelos vazão-erosão são largamente empregados para o planejamento conservacionista e no controle da erosão e de seus impactos (Machado et al., 2003; Silva et al., 2007). Existem vários tipos de modelos, com diferenças importantes na sua formulação e estruturação. Portanto, a escolha de um modelo depende da qualidade dos dados disponíveis, de uma calibração satisfatória e de sua validação (Srinivasan e Paiva, 2009).

Outro importante fator no estudo da diferenciação do comportamento hidrossedimentológico em bacias hidrográficas é o tamanho da bacia. O efeito de escala reflete diretamente nos valores dos parâmetros que afetam o escoamento superficial e a produção de sedimentos. Molinier et al. (1987), por exemplo, realizaram uma primeira avaliação deste efeito na região do Cariri paraibano procurando estabelecer uma relação entre a lâmina escoada e a altura da chuva nas diversas escalas como: parcelas de 1 m², 100 m², microbacias e sub-bacias. Verificaram que a lâmina escoada gerada para um mesmo evento de precipitação, diminui com o aumento da área de contribuição. Assim, o efeito de escala limita a transferência dos parâmetros dentro de uma região hidrologicamente homogênea para bacias da mesma ordem de grandeza. Na ausência dos estudos sobre efeitos de escala, a utilização dos parâmetros calibrados numa bacia alheia deve ser feita com cautela, mas, quando os parâmetros têm características físicas, a representatividade deles numa região pode ser mais ampla.

Atualmente a fronteira do conhecimento em estudos de modelagem de erosão e produção de sedimentos busca entender, principalmente, os processos relacionados com a variabilidade espaço-temporal da produção de sedimentos. A questão da variabilidade espaço-temporal está relacionada com vários fatores, entre estes o papel das fontes de produção de sedimentos, da conectividade entre as fontes de produção de sedimentos e a calha fluvial.

Por outro lado, a variabilidade temporal dos processos de produção de sedimentos está relacionada com os efeitos cumulativos de bacia hidrográfica que se refere ao histórico dos processos de erosão e produção de sedimentos. Englobando todos esses aspectos se insere o conceito do efeito escala, uma vez que todos esses fatores comentados anteriormente são dependentes do tamanho da bacia. Logo para o modelo ser uma ferramenta eficaz para estudos hidrológicos é necessário estar devidamente calibrado, validado e testado. Mas pela escassez de dados medidos em campo, utilizados para se realizar a calibração do modelo é necessário o estudo e utilização de parâmetros regionais é uma necessidade.

Gelfan (2005) relatou como um modelo de base física foi parametrizado e calibrado para uma bacia pequena, e os parâmetros do modelo obtidos foram considerados como regionais. Estes parâmetros foram transferidos para uma outra bacia, com apenas duas estações de medição do escoamento, e os resultados obtidos foram satisfatórios. Em geral, pode não ser prudente considerar apenas uma pequena bacia como uma unidade típica representante de uma região e transferir livremente os seus parâmetros para outras bacias. Por exemplo, Solé-Benet et al. (2003) realizaram um monitoramento por um longo período em duas microbacias no sudeste da Espanha. Relataram a grande influência de escala e dos tipos de solo, resultando em diferenças significativas na lâmina escoada e na erosão dos solos.

Logo a existência dos parâmetros regionais para um modelo hidrossedimentológico é uma hipótese, que implica na possibilidade de simular satisfatoriamente, diversas bacias dentro de uma região hidrologicamente homogênea, com um único conjunto dos parâmetros. Esta idéia também implica na portabilidade de parâmetros calibrados numa bacia para outra com características semelhantes dentro da mesma região.

1.3. Estudos em bacias experimentais

As Bacias Experimentais são as melhores fontes de dados e informações para avaliar a produção de sedimentos e calibrar os modelos de simulação. Logo, nestas bacias experimentais, existe a necessidade de instalar experimentos de campo que

permitem quantificar a produção de sedimentos. Com o objetivo de coletar dados hidroclimáticos e sedimentológicos foi instalada em 1982 no semiárido paraibano a Bacia Experimental de Sumé que teve suas atividades encerradas em 1996. Para dar continuidade a estes estudos foi implantada a Bacia Experimental de São João do Cariri (Srinivasan e Galvão, 2003), que continua sendo operado pela área de recursos hídricos da Universidade Federal de Campina Grande, PB.

Desde, a implantação da Bacia Experimental de São João do Cariri, várias pesquisas vêm sendo realizadas nesta bacia experimental, tendo como objetivo principal a modelagem e análise dos processos físicos de geração do escoamento e produção de sedimentos. Baseados nestes estudos outras bacias foram instaladas, algumas no Estado de Pernambuco como a Bacia do Riacho Jatobá e a Bacia do Riacho Gameleira. Vale salientar que outras bacias experimentais estão sendo implantadas em vários Estados do Nordeste pela REHISA – Rede de Hidrologia do Semi-Árido, constituídas pela UFPE, UFRPE, UFPB, UFCG, UFC, UFRN, UFBA e UFAL, com o intuito de ampliar o acervo de dados e incrementar os conhecimentos dos processos envolvidos.

1.4. Análise das concentrações dos nutrientes do solo

As perdas de solo e nutrientes, causados pela erosão dos solos são as principais causas para a diminuição da produtividade agrícola das terras, fazendo com que seja necessária a intensificação da aplicação de insumos agrícolas, para que não ocorra a redução na produção de alimentos. (Clapp et al., 2000). As perdas hídricas e químicas provocadas pelas atividades agrícolas podem, ainda, acarretar eutrofização da água (Schaefer et al., 2002). Assim, para a análise da produção de sedimentos e perdas de nutrientes em diversas escalas é fundamental a implantação de áreas experimentais, onde as condições do uso do solo e os processos físicos que ocorrem na microbacia podem ser monitorados. Estudos a nível de microbacias seriam um bom ponto de partida nesta direção e a implantação da Microbacia Experimental do Riacho Gameleira teve este objetivo.

Deste modo, uma das maneiras de se estudar os impactos da erosão e das perdas de nutrientes dos solos, é através da determinação da produção de sedimentos em

microbacias. Há diversos estudos sobre o comportamento das descargas sólidas em bacias hidrográficas, como por exemplo, os estudos de Seeger et al., 2004, Zabaleta et al., 2007; Collins et al., 2010, e Trambly et al., 2010. No Brasil, vários estudos vêm sendo realizados para medição da produção de sedimentos em cursos de água, todavia, para bacias na sua maioria localizadas na região Sul e Sudeste do país (Machado et al., 2010; Leite et al., 2009; Paranhos e Paiva, 2008; Scapin et al., 2007; Guadagnin et al., 2005; Bertol et al., 2004; Razini e Lima, 2002; e Dedeczek et al., 1986). Contudo, são poucos, os estudos sobre produção de sedimentos e perdas de nutrientes em bacias da Região Nordeste.

Na região Nordeste, destacam-se os trabalhos de Melo et al. (2009) e Paiva et al. (2010), que avaliaram a quantidade de nutrientes no solo e transporte de sedimentos em suspensão em microbacias do semiárido e do agreste nordestino, respectivamente. Em ambos os estudos os autores avaliaram as influências das características hidrológicas da bacia no comportamento da produção de sedimentos.

1.5. Utilização de isótopos radioativos como traçadores de erosão

A utilização de traçadores de isótopos radioativos, para quantificar a produção de sedimentos de forma indireta, é cada vez mais freqüente entre os pesquisadores da área. Dentre os elementos utilizados para este fim estão o $^{137}\text{Césio}$ (^{137}Cs), o $^7\text{Berílio}$ (^7Be) e o $^{210}\text{Chumbo}$ (^{210}Pb) que têm sido utilizados como ferramentas para abordar a questão da variabilidade espacial dos processos hidrológicos e também como isótopos traçadores que possibilitam avaliar de forma distribuída a erosão do solo e a produção de sedimentos. Por essa razão, esses traçadores têm sido freqüentemente utilizados para avaliar perdas por erosão e ganhos por sedimentação de solo dentro de uma paisagem (Bajracharya et al., 1998).

Schuller et. Al (2006) utilizaram o ^7Be para estimar a produção de sedimentos num trecho de uma bacia hidrográfica, numa encosta dentro da área de estudo. A técnica de utilização do ^7Be para este fim foi originalmente desenvolvida para solos agrícolas, aonde foi utilizada para estimar a redistribuição dos solos, associadas com um período de fortes precipitações, dentro de uma bacia hidrográfica. Os resultados fornecidos pela

técnica do ^7Be foram validados inicialmente por Schuller et. al (2006), confrontando as medições diretas de ganho ou perda do solo durante o mesmo período que obteve-se a quantificação da erosão utilizando o método dos pinos. Este método é baseado na cravação de pinos ao longo de uma encosta onde se realiza o monitoramento em cada ponto, para se observar a erosão e deposição.

Os resultados produzidos pelas duas abordagens foram semelhantes. Schuller et. al (2006) relatam esta investigação, com o objetivo de explorar o potencial da utilização do ^7Be , para quantificar a erosão em área de floresta cultivável e, assim, avaliar a eficácia de uma melhor prática de gestão.

Usando o ^7Be , isótopo que possui uma meia-vida de 53,3 dias, para medições de curto prazo, foram observados resultados satisfatórios semelhantes aos obtidos com a utilização do ^{137}Cs , com meia-vida de 30,2 anos, e o ^{210}Pb , com meia-vida de 22,2 anos. Os dois últimos casos apresentam uma relativa longa meia-vida, para quantificação da produção de sedimentos (Ritchie e McHenry, 1990; Muros e Quine, 1990; Zapata, 2002; Schuller et al., 2004).

O uso do traçador ^7Be possui uma meia-vida muito curta em estudos em áreas agrícolas Blake et al. (1999), Walling et al. (1998), Matisoff et al. (2002), e Wilson et al. (2003). Os princípios envolvidos na utilização do ^7Be para avaliar a produção de sedimentos são essencialmente os mesmos que os associados com o ^{137}Cs e ^{210}Pb . Neste estudo, utilizou-se o berílio para determinar a produção de sedimentos como estratégia para suprir as limitações enfrentadas pela utilização de ^{137}Cs e ^{210}Pb . Desta forma, justifica-se o uso do ^7Be para determinar a produção de sedimentos como estratégia para determinar a distribuição vertical de ^7Be no solo de encosta da microbacia dentro da Bacia Experimental do Riacho Gameleira- PE.

1.6. Objetivos

1.6.1. Objetivo geral

Estudar os padrões espaço-temporais da produção de sedimentos em escala de pequena Bacia Hidrográfica.

1.6.2. Objetivos específicos

1- Realizar o monitoramento da produção de sedimentos numa microbacia, dentro da Bacia Experimental Riacho Gameleira, localizada no Agreste Pernambucano, utilizando medidas diretas em fossa de sedimentação;

2- Realizar a modelagem hidrossedimentológica da microbacia utilizando um modelo hidrossedimentológico distribuído para estimar os padrões espaciais de erosão e deposição de sedimentos;

3- Realizar a análise das concentrações dos nutrientes do solo, sendo eles: carbono, fósforo e potássio nos sedimentos colhidos na fossa de sedimentação;

4- Determinar a distribuição vertical de ^7Be em solo de encosta da microbacia, após a ocorrência de chuvas erosivas, para obter estimativas da erosão local;

5- Correlacionar padrões espaciais de erosão e deposição avaliados utilizando medidas diretas em fossas de sedimentação e com ^7Be , com resultados da modelagem matemática da produção de sedimentos.

1.7. Organização da tese

Esta tese está organizada em 6 capítulos:

No capítulo 1 uma breve introdução dos temas que serão tratados no trabalho. No capítulo 2 estão apresentadas a Fundamentação Teórica e Revisão Bibliográfica. No **capítulo 3** está descrito os Materiais e Métodos. Os resultados obtidos estão apresentados, analisados e discutidos no **capítulo 4**. O **capítulo 5** apresenta as conclusões e recomendações do trabalho, e no **capítulo 6** estão apresentadas as Referências Bibliográficas.

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.0. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Considerações gerais

A erosão compreende os processos de desagregação, transporte e deposição dos sedimentos. 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 ficará exposto à ação do vento ou do escoamento superficial, ou mesmo a ação de outras precipitações.

O transporte através da água pode acontecer de várias maneiras, dependendo do fluxo e das características das partículas. Partículas 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. Essa deposição geralmente acontece em deltas de riachos e em áreas onde a velocidade do fluxo é bastante reduzida. Essa concentração de sedimentos em equilíbrio limite no fluxo superficial é denominada de capacidade de transporte de sedimentos (Simons e Sentürk, 1992).

O escoamento superficial é o resultado da interação da precipitação com a bacia hidrográfica. Geralmente é modelado propagando-se o excesso de precipitação, definido como sendo a diferença entre a intensidade de precipitação e a capacidade de infiltração do solo, onde é conhecido como fluxo Hortoniano, o que ocorre normalmente em regiões áridas e semi-áridas (Lopes, 2003). A infiltração é a passagem de água da superfície para o interior do solo. É um processo que depende, fundamentalmente, da água disponível para infiltrar, da natureza do solo, 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 pra 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 o solo, 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), Green e Ampt (1911) e Smith e Parlange (1978). Estas equações são muito utilizadas em modelos hidrológicos para gerar escoamento superficial.

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 fórmulas 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 bastante difícil.

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 nas vertentes 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 deposição dos sedimentos ou mais erosão. Conseqüentemente, a erosão poderá resultar no aprofundamento e alargamento do canal (Santos, 1994).

2.2. Medidas diretas em uma fossa de sedimentação

Muitos estudos hidrossedimentológicos foram e ainda estão sendo realizados em todo Brasil (Paiva, 2008). O grupo de pesquisa da Universidade Federal de Campina Grande vem realizando estudos de medidas diretas de produção de sedimentos em fossas de sedimentação desde 1981. O trabalho iniciou-se na Bacia Experimental de Sumé e depois na Bacia Experimental de São João do Cariri (Srinivasan e Galvão, 2003).

A Bacia Experimental de Sumé (BES) foi instalada na propriedade particular chamada Fazenda Nova, no município de Sumé, Estado da Paraíba, dentro da Bacia representativa de Sumé (BRS), localizada na sub-bacia do Alto Paraíba, próxima a cidade de Sumé no Estado da Paraíba, numa latitude aproximada de 7°40' Sul e longitude aproximada de 37°00' Oeste (Cadier e Freitas, 1982). Atualmente a BES está desativada. Situava-se na altura do km 118 da BR-412, entre as cidades de Sumé e Monteiro, numa latitude de 7°44' Sul e longitude 36°57' Oeste (Cadier et al., 1983). Esta região, uma das mais secas do Nordeste do Brasil, é denominada Cariri Velhos, ou apenas Cariri.

A Bacia Experimental de São João do Cariri (BESJC) desenvolve suas atividades de campo desde 1985 com a instalação e operação dos primeiros instrumentos. Desde então pesquisas na área de hidrologia vem sendo desenvolvidas com a operação de forma regular e em regime permanente de suas estações climatológica de superfície e dos postos pluviométricos, pluviográficos, fluviométricos e fluviográficos instaladas em diferentes sub-bacias. Os dados coletados possibilitaram uma análise quantitativa dos efeitos de escala sobre os processos medidos. Os trabalhos iniciaram com a construção de duas parcelas de erosão com área de 100 m². Em 2000 foi construída a primeira micro-bacia com área de 0,18 ha. Em 2001 duas novas micro-bacias aninhadas foram construídas possuindo áreas de 0,16 e 1,63 ha. No ano de 2002, com o desenvolvimento do projeto IBESA (Implantação de Bacias Experimentais no Semi-Árido), foram instaladas três estações pluviométricas automáticas, uma estação climatológica de superfície automática, duas estações fluviométricas e fluviográficas,

além da recuperação de duas estações pluviométricas e uma pluviográfica (Srinivasan et al., 2004).

A fossa de sedimentação utilizadas na BES e BESJC é pré-calibrada e o hidrograma do escoamento gerado é obtido através da curva de calibragem do vertedor e do linígrama registrado. O volume total escoado é calculado pela soma do que passa pelo vertedor e aquele que fica retido na fossa. A avaliação da produção total de sedimentos da bacia é baseada em amostragem realizada no material retido na fossa (em suspensão e depositado no fundo) e no fluxo vertente. A amostragem dos sedimentos retidos na fossa foi realizada em três estágios, conforme estabelecido no roteiro de coleta de dados para as microbacias (Srinivasan e Galvão 2003). A concentração obtida pela média das amostras em cada estágio é relacionada a um volume de água correspondente. Três orifícios situados na placa do vertedor e em alturas diferentes drenavam uma pequena parte da mistura de água-sedimento que passava pelo vertedor, acumulando-a em dois recipientes coletores, nos quais eram coletadas duas amostras. Uma terceira amostra adicional, quando possível, era coletada manualmente durante o evento, na descarga do vertedor. A concentração média destas duas ou três amostras corresponde ao volume vertido. A produção total de sedimentos é calculada pelo somatório da produção relativa a cada estágio da fossa e ao escoamento através do vertedor (Srinivasan, 2006). A Figura 1 apresenta o formato da fossa de sedimentos, bem como a localização relativa dos amostradores de sedimentos em suspensão e o local de instalação do linígrafo.

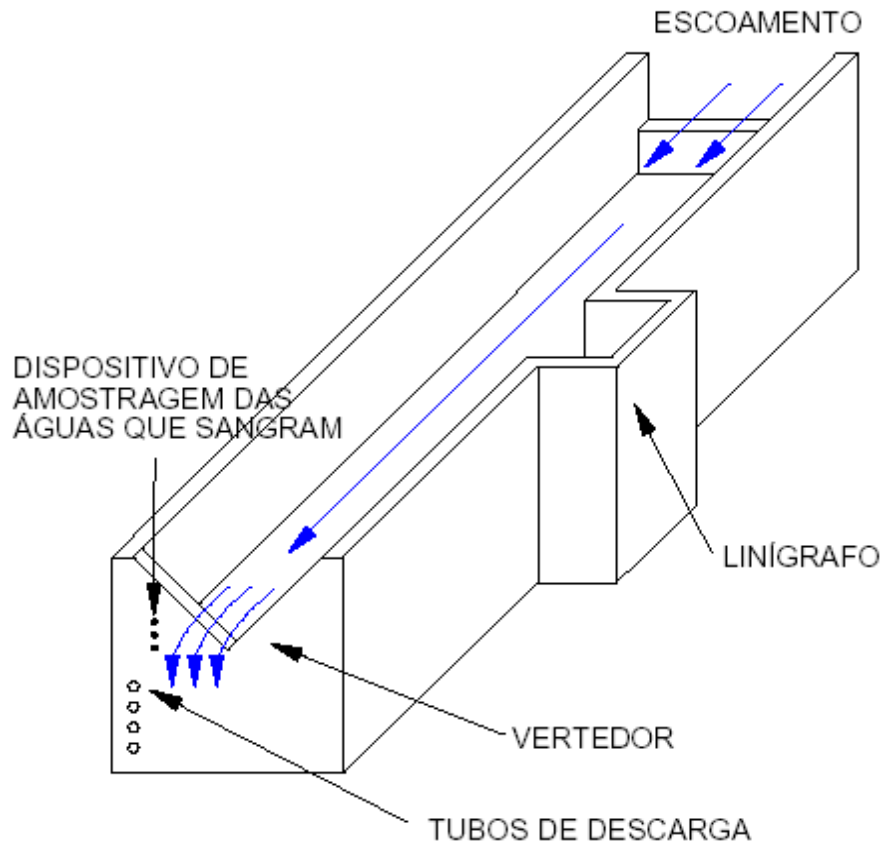


Figura 1. Esquema da fossa de sedimentação utilizada na BES e BESJC. (Cadier et al., 1983).

2.3. Análise dos teores de carbono, potássio e fósforo nos sedimentos

Vários estudos (Ávila, 2005; Leite et al., 2009; Machado et al., 2010; Fraga e Salcedo, 2004; Salcedo e Sampaio, 2008; Santos e Salcedo 2010; Steiner, 2010) enfocam a questão da análise dos teores de carbono, nitrogênio e fósforo nos sedimentos. Vieira et. Al, (2002) estudaram a qualidade da água e sedimentos do reservatório de Ibitinga- SP, avaliando as características limnológicas do reservatório no período de outubro/89 a novembro/90. Eles constataram a existência de mudanças na qualidade de água e sedimentos espaciais e entre as sações.

Os sedimentos são considerados de grande importância na avaliação do nível de contaminação dos ecossistemas aquáticos, devido não só a sua capacidade em acumular metais, mas, também, por serem reconhecidos como transportadores e possíveis fontes de contaminação (Froehner et al., 2008).

Froehner et al. (2008) realizaram uma avaliação da composição de sedimentos da Bacia do Riacho Barigui, com relação à presença de metais e às razões de C:N:P (carbono, nitrogênio e fósforo). Neste estudo foram observadas alterações na composição dos sedimentos ou mesmo a presença de metais que podem estar associadas ao lançamento indiscriminado de esgotos domésticos e industriais.

O carbono, o nitrogênio e o fósforo podem ser transportados no escoamento superficial em solução ou particulado, entrando aí os nutrientes adsorvidos às partículas erodidas. Outro aspecto importante e preocupante é o fato de sedimentos contribuírem para o assoreamento dos corpos de água quando se depositam nos corpos dos mesmos (Ávila, 2005).

Para determinar a quantidade de nitrogênio, fósforo e carbono nos sedimentos transportados no escoamento superficial a partir dos diversos tipos de manejos de uma região, uma boa opção seria a instalação de parcelas de erosão onde o escoamento superficial é conduzido a um tanque coletor. Com o escoamento de um evento de precipitação armazenado neste tanque, podem ser coletadas amostras de sedimentos para análise laboratorial. Com estas análises é possível quantificar o nitrogênio, fósforo e carbono nos sedimentos que são carregados da parcela de erosão. Entretanto, não é possível determinar o comportamento destes ao longo do percurso até o exutório da bacia. Para tanto, seria necessário criar um sistema de coleta dessas informações em todas as partes da bacia.

Ávila (2005) dividiu a bacia em classes de acordo com o uso e ocupação do solo, e utilizou o método racional para determinar a vazão de pico que posteriormente foi utilizada para a estimativa da carga de nitrogênio e fósforo nos sedimentos gerados pelas classes da bacia.

O transporte de carbono, fósforo, e potássio nos sedimentos por escoamento superficial e erosão podem causar danos às águas superficiais, principalmente com a poluição e assoreamento de riachos e lagos, como relatado anteriormente. Entretanto é necessário considerar também os aspectos econômicos que esse transporte poderá causar. Grandes perdas de nutrientes e da camada superficial do solo aumentam o custo de produção agrícola, sobretudo com a necessidade de adubação e com as práticas que busquem aumentar a produtividade e controle do processo de erosão (Said et al., 2004).

2.4. Modelagem hidrossedimentológica

2.4.1 Classificação dos modelos hidrológicos

Vários modelos hidrológicos têm sido desenvolvidos para representar os processos de transformação entre as entradas como a precipitação na bacia e respostas como o escoamento superficial e produção de sedimentos.

Classificações e conceituações sobre modelos matemáticos para hidrologia estão exaustivamente discutidas na bibliografia (Claker, 1973; Overton e Meadows, 1976; Haan et al., 1982; Tucci, 1987; Todini, 1988; Magalhães, 1989; Rennó e Soares 2000; Silva, 2005; Sing, 1996).

De uma forma geral, os modelos podem ser classificados, como:

(a) **Determinísticos** – são aqueles modelos que produzem 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.

(b) **Estocásticos** – são aqueles modelos quando uma ou mais variáveis envolvidas na modelagem tem um comportamento aleatório, possuindo distribuição de probabilidade.

(c) **Empíricos** – são ditos empíricos quando sua formulação não possui nenhuma representação explícita dos processos físicos da bacia, podendo possuir uma característica regionalista.

(d) **Conceituais** – Os modelos conceituais são baseados nas equações que descrevem o processo físico conceitual ou hipotético não sendo necessariamente baseado no processo real.

(e) **Fundamentais** – Estes modelos são baseados em conceitos físicos e teorias sobre a dinâmica dos processos de escoamento e erosão. Assim, eles fornecem maiores informações sobre a variação dos processos como de erosão e da carga de sedimentos, no espaço e no tempo, durante um evento, em relação aos outros tipos de modelos.

(f) **Concentrados** – Nos modelos concentrados, a área da bacia é representada de forma única, isto é, homogênea, não sendo possível a distribuição das características de parâmetros físicos relacionados ao solo, a vegetação e a chuva. No seu

desenvolvimento são atribuídos valores médios representativos para toda a área para cada parâmetro do modelo.

(g) **Distribuídos** – Estes modelos permitem que toda a área modelada seja dividida em unidades com formatos irregulares ou regulares, consideradas como homogêneas, reconhecendo desta forma a distribuição espacial das variáveis e dos parâmetros considerados. Este tipo de modelo permite considerar dados de pluviometria e outros processos levando em consideração sua variabilidade espacial, sendo assim, mais representativa do real.

(h) **Contínuos** – são aqueles que simulam os processos hidrológicos num longo período, sendo feita a simulação em todo o período, da forma contínua.

A questão da modelagem considera também a escala dos modelos, pois pesquisas revelam que os parâmetros dos modelos sofrem influência do fator de escala e que escalas menores representam melhor as características da área de estudo em questão.

Muitos estudos foram desenvolvidos através dos modelos hidrológicos. O modelo hidrológico MEDRUSH (Kirby et al., 1997), um sistema de informação geográfica combinado com um modelo distribuído, desenvolvido para grandes escalas, que se destina a ser aplicável a áreas de até 5.000 km², por períodos de até 100 anos. Estes dois modelos foram combinados gerando o modelo MEDALUS (baseado em estudos de grandes escalas, utilizando dados atmosféricos, cobertura vegetal, escoamento superficial e erosão, e componentes de redistribuição de água).

Outros modelos muito utilizados em hidrossedimentologia são também o: KINEROS (modelo hidrossedimentológico para pequenas bacias) (Woolhiser e Smith, 1990), WEPP (modelo hidrossedimentológico utilizado em grandes bacias) (Flanagan e Nearing, 1995), EUROSEM (modelo baseado em um processo de simulação de erosão em uma base de eventos, aplicado para pequenas bacias) (Morgan et al., 1992) e LISEM (modelo hidrossedimentológico, simula os efeitos espaciais de eventos de chuva em pequenas bacias) (de Roo et al., 1996).

No Brasil, Sparovek et al. (2000) e Bacchi et al. (2000) realizaram comparações entre três métodos de predição de erosão, sendo eles: o método utilizando o Césio-137, predição através da USLE e através do modelo WEPP (Water Erosion Prediction Project). O modelo WEPP é baseado nos princípios físicos dos processos inerentes à erosão do solo, apresentando várias vantagens sobre os modelos empíricos. Este modelo

considera os efeitos das mudanças de uso do solo e também modela a variabilidade espacial e temporal dos fatores que afetam os processos hidrológicos e da erosão que ocorrem em uma encosta.

Pandey et al. (2008) utilizaram o modelo WEPP em uma pequena bacia agricultável na Índia para observar seu comportamento. Foi realizada uma calibração, validação e teste de sensibilidade dos parâmetros calibráveis e se observou que o parâmetro de significativa sensibilidade foi a condutividade hidráulica do solo, que alterava a vazão e a erodibilidade que contribuem para produção de sedimentos. Recentemente, Dun et al. (2009) aplicaram o modelo WEPP em uma bacia recoberta de floresta nativa considerando um fator de soma importância, a interceptação das copas das árvores. Para isso foi alterado o algoritmo do modelo para considerar esta variável e os resultados mostram que as modificações produziram resultados satisfatórios.

Em razão da crescente melhoria de desempenho computacional, vem sendo empreendido um grande esforço para o estudo de modelos matemáticos que lidam com os fenômenos de variabilidade espacial no fluxo superficial, assim como o transporte de sedimentos usando uma aproximação bidimensional inteiramente dinâmica. Nestes estudos, há uma tendência para utilizar modelos matemáticos baseados nos processos físicos de forma distribuída para representar a variabilidade espaço-temporal dos processos na área em estudo e abordando a questão do efeito escala na modelagem (Abbott et al., 1986a, e 1986b; Bathurst, 1986; Lane e Nearing, 1989; Lou, 2010; Nearing et al., 1989; Risse et al., 1994; Santos et al., 2007; Srinivasan e Paiva, 2009; Paiva, 2008). Estas pesquisas concluíram que na prática, é necessário determinar parâmetros físicos do solo, utilizados nas equações de base física que gerem resultados coerentes de lâminas do escoamento e produção de sedimentos. Para se obter resultados satisfatórios, no emprego dos modelos computacionais, eles precisam estar bem verificados ou calibrados e para isso é necessário se obter dados de campo, que na maioria dos casos, são oriundos de bacias experimentais.

Várias pesquisas têm sido realizadas utilizando dados de bacias experimentais tendo como objetivo, dentre outros, modelar o processo de escoamento superficial e erosão do solo em áreas semiáridas do nordeste brasileiro e áreas afins (Galvão, 1990; Santos, 1994; Santos, 1997; Pereira, 1997; Figueiredo, 1998; Aragão, 2000; Lopes 2003; Srinivasan e Galvão, 2003; Cruz, 2004; Araújo Filho, 2004; Paiva, 2008; Santos, 2008). Atualmente, outras pesquisas também estão sendo realizadas no âmbito da

REHISA - Rede de Hidrologia do Semi-árido.

Alguns estudos já foram realizados na bacia do Riacho Gameleira, em Pernambuco e outros ainda estão em andamento. Araújo Filho, (2004) aplicou o modelo hidrológico TOPMODEL para modelar o processo do escoamento superficial, que utiliza o modelo digital do terreno, leva em consideração a área de contribuição a montante de cada célula e a declividade da célula, incorporando-os no índice topográfico que representa a potencialidade da célula em saturar. Assim, de acordo com a precipitação pluviométrica, com o estado de saturação do solo e com o déficit hídrico das células, obtém-se a vazão na seção exutória da bacia estudada.

Para resolver alguns problemas que surgem nas aplicações do TOPMODEL a casos reais, foi feito o desenvolvimento teórico para levar em conta a distribuição espacial do déficit hídrico máximo. Os resultados mostraram que após a inserção da distribuição espacial do déficit hídrico, foi obtida uma melhor representação do estado de saturação das células. A inclusão deste conceito da distribuição espacial do déficit hídrico máximo facilita a aplicação do modelo em regiões semiáridas, como no caso do semiárido nordestino onde a camada de solo é rasa e a mesma pode atingir com frequência, o limite máximo do déficit hídrico.

Dentre os modelos de base física disponíveis na literatura está o KINEROS2 proposto por Smith et al. (1995) e que tem sido largamente aplicado em bacias de diferentes tamanhos e diferentes coberturas e usos do solo fornecendo resultados satisfatórios (Srinivasan et al., 2006; Aragão et al., 2006; Santos et al., 2007; Martinez-Carreras et al., 2007; Aragão et al., 2008; Paiva, 2008).

O KINEROS2 – Kinematic Runoff-Erosion Model (Woolhiser et al., 1990) é um modelo chuva-vazão-erosão que utiliza a aproximação da onda cinemática para modelar o fluxo. Este modelo é do tipo distribuído de base física, onde a bacia é representada por uma rede de planos e canais. O KINEROS2 pode simular cada evento individualmente ou uma série dos eventos continuamente. No primeiro caso, a simulação se encerra no fim do escoamento e cada evento necessita da calibração da saturação inicial e no segundo caso, o modelo acompanha a variação da umidade no solo nos intervalos sem chuva. O modelo descreve os processos de interceptação, infiltração, vazão e erosão de pequenas bacias, e as equações diferenciais descrevendo o escoamento, em planos e canais são resolvidas pela técnica de diferenças finitas.

2.5. O uso dos isótopos traçadores em estudos de sedimentologia

Vários trabalhos (Andrello et al., 2003; Bacchi et al., 2000; Blake et al., 1999; Correchel et al., 2003; Hawley et al., 2004; Iaea, 1998; Koch e Mann, 1996; Papastrifanou e Ioannidou, 2004; Sparovek et al., 2000; Wallbrink e Murray, 2002 & Walling et al., 1999). no mundo todo vêm utilizando isótopos traçadores como Césio, Chumbo, Berílio e outros, para avaliar o padrão de distribuição espacial dos processos de mobilização e depósito de sedimentos.

O uso potencial do Berílio (^7Be) e outros isótopos traçadores em estudos da mensuração da quantificação da erosão no solo foi descrito com relevante atenção por vários pesquisadores, podendo-se citar alguns como: Ritch e Mchenry (1990); IAEA (1998); Walling e Quine (1990, 1992, 1995); Walling (1998); Walling e He (1999); Blake et al. (1999), Matisoff et al. (2002), Wilson et al. (2003), Schuller et al. (2006) e Sepúlveda et al. (2008). Estes estudos foram realizados em diferentes cenários, mostrando que o $^{137}\text{Césio}$ e $^7\text{Berílio}$ são ferramentas eficazes para avaliar a quantidade de produção de sedimentos depositada e a perda de solo, que também representa muitas vantagens com relação aos tipos de monitoramento convencionais.

O monitoramento convencional se baseia na utilização de redes de monitoramento hidrossedimentológicos, que geralmente utilizam equipamentos caros, e que necessitam de mão de obra especializada para realizar as medições, ou a instalação de equipamentos automatizados que são ainda mais caros e sujeitos aos danos.

O ^7Be possui uma energia de 477,590 keV (Lal et al., 1958; Lal e Suess, 1968; Kaste et al., 2002; Schuller et al., 2006). A produção de ^7Be depende do fluxo de raios cósmicos, que varia com a latitude, altitude, e a atividade solar (Feely et al., 1989). Atividade solar máxima resulta em aumento da deformação cósmica dos raios do sistema solar que diminui o fluxo dos raios cósmicos para a Terra e, por sua vez, diminui a produção de ^7Be (Gerasopoulos et al., 2003; Papastefanou e Ioannidou, 2004). O ^7Be possui concentrações na ordem de 15 a 25% na superfície terrestre (Koch and Mann, 1996). O ^7Be em contato com o solo e vegetação é rapidamente absorvido, portanto é rapidamente fixado pela superfície do solo (Hawley et al., 1986; Wallbrink e Murray, 1996; Kaste et al., 2002). As evidências sugerem que o ^7Be é comumente encontrado até 10 mm aproximadamente da parte superior do perfil do solo (Wallbrink e Murray, 1996; Blake et al., 1999; Walling et al., 1999).

O sucesso da utilização de ^7Be para quantificar a produção de sedimentos em um curto evento chuvoso, com precipitações superiores a 25 mm, em terras agrícolas e susceptíveis a erosão e deposição foi relatado por Blake et al. (1999) e Walling et al. (2002). A abordagem empregada baseia-se na comparação da atividade específica do ^7Be medida em (Bq.m^{-2}) em um ponto de amostragem, com uma referência para determinada atividade nas proximidades em uma área imperturbável e estável, em que nem a erosão nem deposição estejam ocorrendo.

O grau de diminuição ou aumento da atividade do ^7Be possui correlação com a profundidade das camadas do solo. Em áreas de floresta, o ^7Be possui fixação rápida e forte no solo, em virtude do baixo índice de erosão. Wallbrink e Murray (1996), Blake et al. (1999), Walling et al. (1999) citaram que a distribuição vertical do ^7Be no solo é caracterizada por uma diminuição exponencial na profundidade. Com base nesta premissa, Walling et al. (1999a) e Blake et al. (1999) propuseram um modelo simples para converter as medições de ^7Be no solo como um traçador da produção de sedimentos. Os componentes deste modelo são descritos usando termos definidos segundo a Comissão Internacional de Unidades de Radiações - Corporación de Fomento de la Producción (2001).

Resultados apresentados por Blake et al. (1999), Matisoff et al. (2002) e Schuller et al. (2006) fornecem uma clara demonstração do potencial da utilização do ^7Be para medições da produção de sedimentos, perdas por erosão ou ganho por deposição, utilizando eventos de curto período de tempo.

Embora a técnica de medição com o ^7Be possua algumas limitações, incluindo a necessidade de assegurar que a atividade do ^7Be seja uniforme em toda a área de estudo, imediatamente antes do período de precipitações intensas e a necessidade de utilizar instalações específicas para a determinação da atividade do ^7Be . A mesma foi medida por espectrometria gama com detector tipo germânico em contagens de 48 horas (172800 s) por Bajracharya et al. (1998), demonstrando um período longo de contagem o que pode onerar os custos. Entretanto, o método oferece também um certo número de vantagens importantes sobre utilizações mais convencionais. O processo de contagem através de raios gama em isótopos radiativos do tipo $^{137}\text{Césio}$, $^7\text{Berílio}$ e $^{210}\text{Chumbo}$ são apresentados de forma completa em Bonniwell (2001). Os métodos convencionais estudados neste trabalho são as coletas manuais de sedimentos na fossa de sedimentação e a modelagem hidrossedimentológica. Comparando estes dois métodos com a medição

da produção de sedimento utilizando a técnica do ^7Be mostram inicialmente algumas diferenças. No caso das fossas de sedimentação, as dificuldades que se mostram é a instalação, operação e custos, a necessidade de instalar as fossas de sedimentação muito antes do período de estudo, e as incertezas sobre a medida que uma fossa delimitada em um trecho de riacho é representativa e a necessidade de se realizar a coleta a cada evento de chuva. E na modelagem hidrossedimentológica distribuída teria como dificuldade a necessidade de estimar ou calibrar vários parâmetros que muitas vezes precisam ser determinados através de ensaios em campo, que são onerosos e necessitam de muito tempo.

A principal vantagem do ^7Be é a capacidade de reposição no solo, após um período curto de precipitação intensa, a falta de necessidade de dispendiosa e trabalhosa construção de experimentos em campo, e dispensa visitas periódicas para coleta de dados logo depois do período de precipitações. Uma clara vantagem do uso do traçador ^7Be sobre a fossa de sedimentação é a capacidade de reunir informações espacialmente distribuídas sobre os montantes de erosão e deposição.

Um requisito importante na abordagem do uso do ^7Be é assegurar que a área estudada possua uma distribuição homogênea, ou seja, que a encosta tenha praticamente o mesmo relevo, vegetação e distribuição pluviométrica, antes do início da investigação. Isto pode assegurar que a investigação seja analisada separadamente dos eventos anteriores de processos erosivos. Por um período de suficiente de tempo, garanta que qualquer heterogeneidade espacial causada pela redistribuição do solo, associada a esses eventos erosivos anteriores, sejam removidos pelo decaimento radioativo. A técnica do ^7Be dará como resposta a quantificação da produção de sedimentos na dada encosta estudada e com isso poderá saber o quanto neste ponto se contribui para o assoreamento da calha do Riacho.

O uso do ^{137}Cs , ^7Be e ^{120}Pb para validação dos resultados obtidos através de modelos hidrossedimentológicos na análise da distribuição da produção de sedimentos foram apresentados por: de Roo e Walling (1994), Chapell (1996), Govers et al. (1996), Ferro (1997), Walling (1998) e Walling e He (1998). Estes pesquisadores, fizeram a exploração deste potencial dos isótopos, ainda de forma limitada. É a contribuição dessas pesquisas utilizando modelos hidrossedimentológicos, ainda de forma inicial, que apresenta resultados promissores. Dentro dos estudos (Andrello et al., 2003; Bacchi et al., 2000; Correchel et al., 2003; Iaea, 1998; Papastrfanou e Ioannidou, 2004;

Sparovek et al., 2000 & Walling et al., 1998) foi utilizado o ^{137}Cs , em medições para validar os resultados de dois modelos distribuídos, incluindo a topografia da área de deposição e de erosão do solo. Os modelos utilizados foram AGNPS e ANSWERS. O ^{137}Cs foi utilizado para obter a distribuição espacial, através da estimativa da taxa de produção de sedimentos dentro da bacia, que juntamente com as medições em campo para a validação dos resultados do modelo, levou a uma comparação dos resultados de um modelo hidrossedimentológico ao valor da redistribuição do ^{137}Cs . Dessa forma, testou-se a capacidade deste modelo para reproduzir os fenômenos hidrossedimentológicos da área em estudo.

No Brasil, Andrello (2003) utilizou o ^{137}Cs , fazendo uso do modelo para avaliar as condições edafoclimáticas e de conteúdo de ^{137}Cs da região de Londrina (PR). Foi observado que o uso do ^{137}Cs apresentou-se como uma metodologia adequada para a determinação de taxas de perdas e ganhos de solo por erosão hídrica e para utilização em solos com cobertura de pastagem e cultura de soja, obtendo-se valores coerentes com os de parcelas experimentais de erosão, para o mesmo tipo de solo.

Correchel (2003), ainda no Brasil, fez a avaliação de índices de erodibilidade do solo através de técnicas da análise da redistribuição do decaimento do ^{137}Cs . Porém, fez a comparação dos resultados obtidos com esse isótopo e os resultados obtidos através da equação universal de perda de solo - USLE. Observou-se que a variabilidade da deposição e produção de sedimentos afetou a confiabilidade deste estudo, pois a USLE gera apenas o total de sedimento erodido e não representa a variabilidade dos processos no solo. O uso de outros isótopos traçadores como ^{210}Pb e ^7Be , por exemplo, ainda são muito pouco explorados no Brasil.

CAPÍTULO 3

MATERIAIS E MÉTODOS

3.0. ÁREA DOS ESTUDOS

3.1. Área experimental

Os estudos foram desenvolvidos numa microbacia localizada dentro da Bacia Experimental do Riacho Gameleira, localizada no município de Vitória de Santo Antão, no Agreste de Pernambuco, aproximadamente entre a latitude 8°08' sul e a longitude 35°31' oeste (Figura 2). A Bacia Experimental do Riacho Gameleira possui uma área de drenagem de 16,5 km², estando inserida em uma área de transição entre a zona da mata e o agreste. A bacia do Riacho Gameleira faz limites: ao norte, com os municípios de Glória de Goitá e Chã de Alegria, ao sul, com Primavera e Escada, ao leste, com Moreno, Cabo e São Lourenço da Mata e a oeste, com Pombos (Dutra et al., 2005).

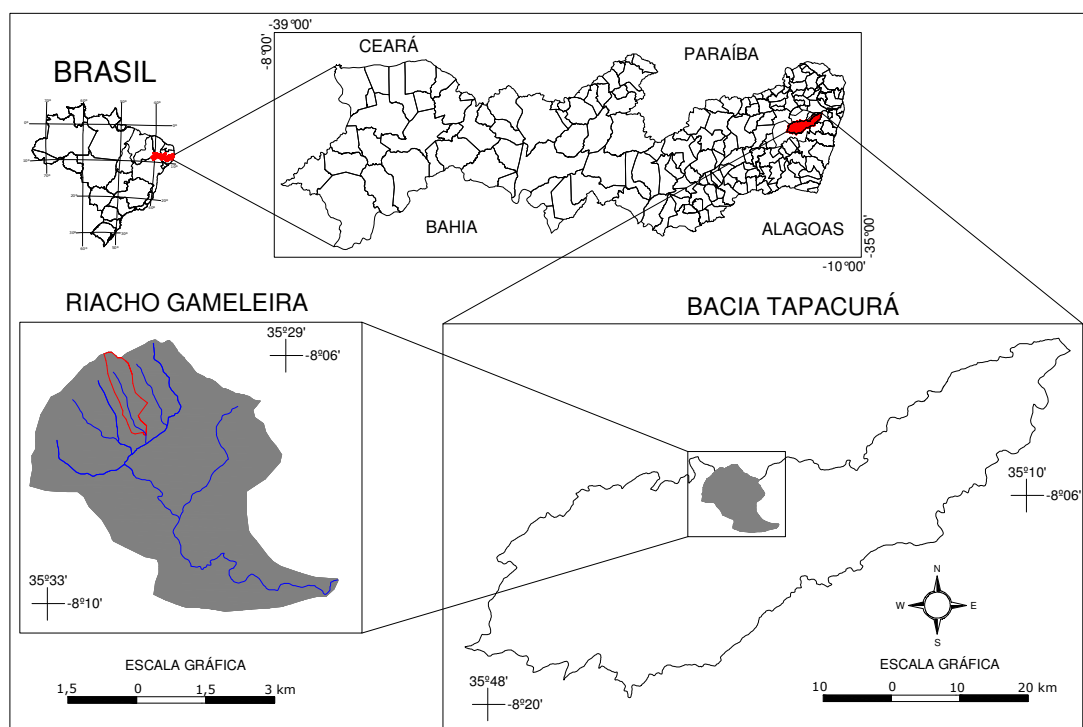


Figura 2. Localização da Microbacia Experimental estudada dentro Bacia Experimental do Riacho Gameleira.

Os solos na bacia são predominantemente do tipo Argissolos e Gleissolos (Figura 3). Os Argissolos possuem ótima condição de drenagem, estrutura desenvolvida em blocos e grande porção de argila na sua composição, com porcentagem de silte superior a 20%. Os Gleissolos ocorrem nas faixas marginais aos cursos d'água, se caracterizam por baixo coeficiente de infiltração quando saturados, são basicamente constituídos por perfis com uma camada que impede o movimento de água em profundidade ou com textura média a argilosa e baixa condutividade hidráulica (Braga, 2001).

O Riacho Gameleira é afluente do Riacho Tapacurá e está situado na Bacia Hidrográfica do Riacho Capibaribe. A Bacia do Riacho Tapacurá é de grande importância para o abastecimento e controle de enchentes da região metropolitana do Recife (Araújo Filho, 2004). O relevo da Bacia do Riacho Gameleira é representado por morros de declividade elevada, tendo seu ponto mais alto situado na cota de 430 m e o ponto mais baixo na seção do exutório do Riacho Gameleira, na cota 140 m (Figura 5).

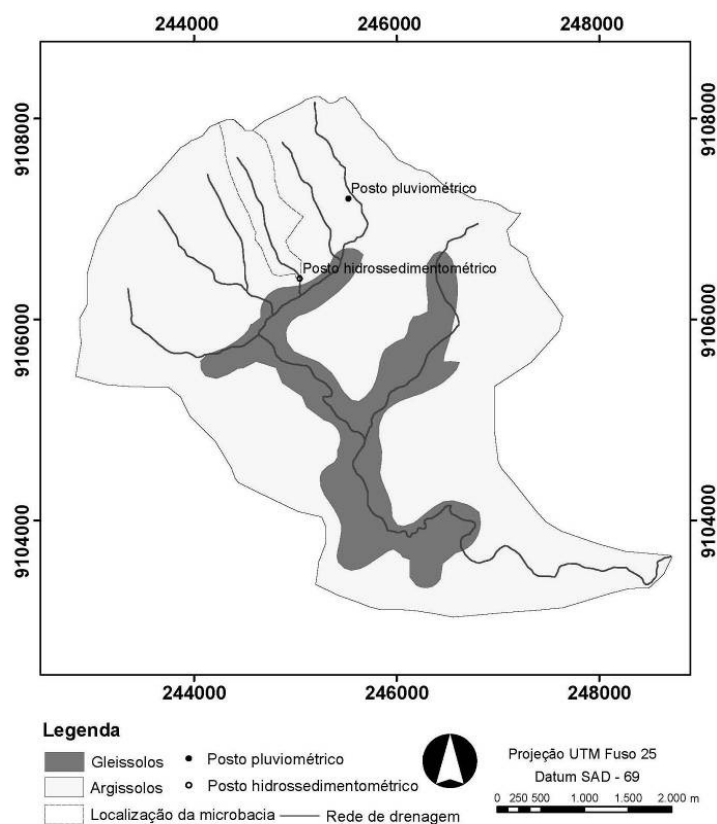


Figura 3. (a) Mapa de uso e ocupação do solo da BERG e (b) Mapa dos tipos de solo e localização da área de contribuição da seção hidrossedimentométrica.

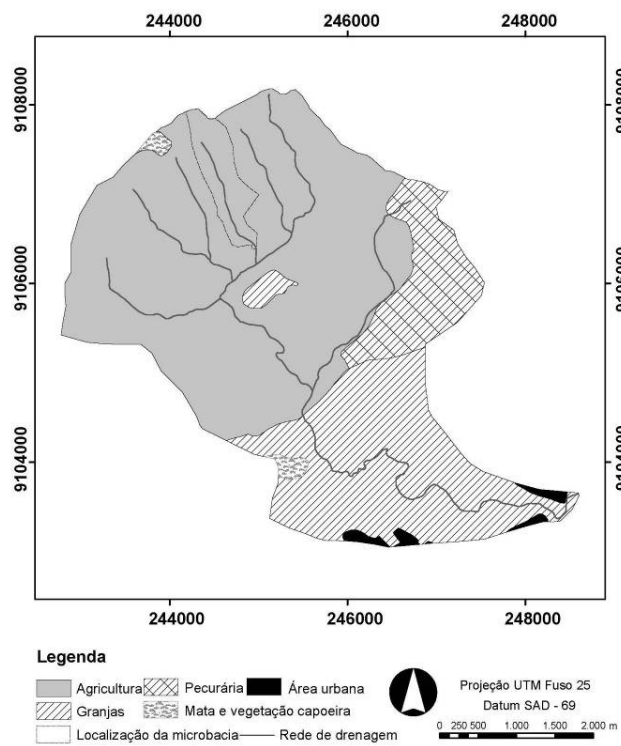


Figura 4. (a) Mapa de uso e ocupação do solo da BERG.

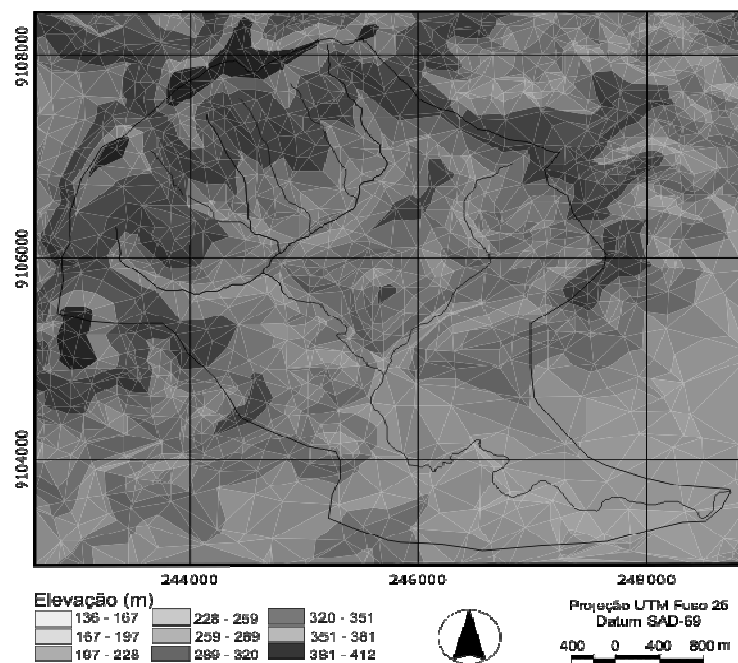


Figura 5. Modelo digital de elevação da Bacia Experimental do Riacho Gameleira.

A Bacia Experimental do Riacho Gameleira possui área de drenagem de 16,5 km², situa-se numa área de transição da zona da mata próximo ao início da região semiárida, com curso principal perene mantendo uma vazão pequeníssima no período de estiagem. O curso se torna intermitente próximo à sua nascente, devido aos barramentos de água para uso na irrigação (Dutra, 2005). As maiores propriedades existentes na bacia são o engenho Gameleira com 362,3 ha e a Escola Agrotécnica de Vitória de Santo Antão com 124 ha. Os períodos chuvosos na bacia são de março a julho e o período seco é de outubro a dezembro (Dutra, 2005).

A Microbacia Experimental do Riacho Gameleira abrange uma área de 58,7 ha e vem sendo estudada e monitorada pelo Grupo de Recursos Hídricos da Universidade Federal de Pernambuco há mais de cinco anos. A Tabela 1 apresenta as principais características da Bacia Experimental do Riacho Gameleira.

Tabela 1. Principais características da Microbacia Experimental do Riacho Gameleira.

Parâmetros	Valor	Unidade
Área da microbacia	58,7	ha
Perímetro	4,1	km
Temperatura média	26	°C
Altitude na nascente	370	m
Elevação Mínima	140	m
Elevação Máxima	370	m
Desnível da nascente ao exutório	230	m
Ordem dos cursos d'água	3	—

O clima na microbacia segundo a classificação de Köppen é do tipo AS' (quente e úmido com chuvas de outono a inverno), e o período não-chuvoso é de setembro a março, e a estação chuvosa é de abril a agosto. O tipo predominante de solo da Microbacia Bacia Experimental do Riacho Gameleira é o Argissolo, que possui ótima condição de drenagem, estrutura desenvolvida em blocos e grande porção de argila na sua composição, com porcentagem de silte superior a 20%, e com elevada taxa de infiltração (Furtunato et al., 2009). O uso do solo é predominantemente, para agricultura e pecuária, e existem na bacia ainda pequenas áreas remanescentes de mata.

A Figura 6 apresenta a distribuição temporal da precipitação média mensal de 2004 a 2009, para a Microbacia Experimental do Riacho Gameleira. Segundo Silva et al. (2010), a precipitação anual na região do entorno da microbacia é muito irregular, variando entre 600 e 1.500 mm ano⁻¹, e a precipitação média anual é de aproximadamente 1.200 mm ano⁻¹, com um coeficiente de variação de 31% (Silva et al., 2010). No período chuvoso, a precipitação mensal na microbacia variou entre 120 e 160 mm, enquanto no período menos chuvoso, a precipitação não ultrapassou 80 mm (Figura 3).

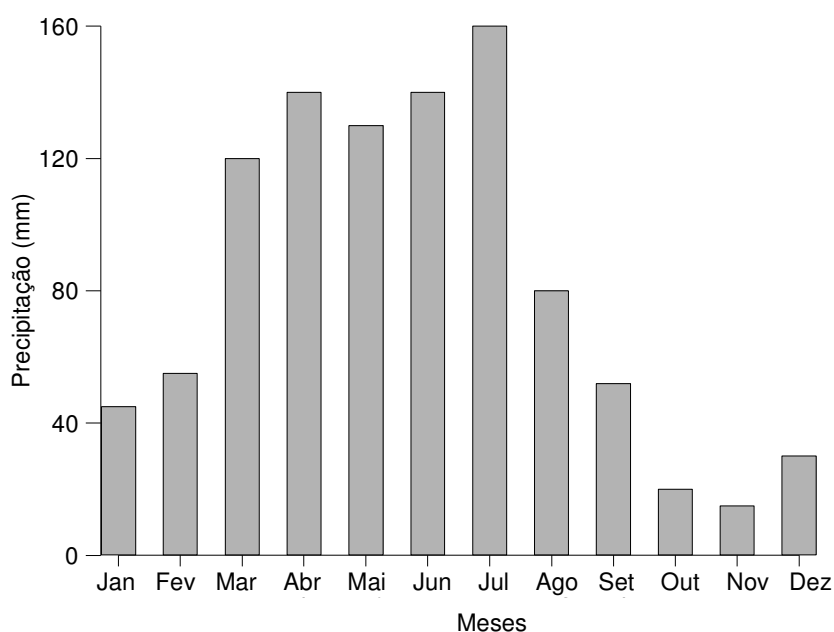


Figura 6. Precipitação média mensal entre 2010 e 2011 na Bacia Experimental do Riacho Gameleira.

Foi selecionada também, uma encosta contribuinte da calha do Riacho Gameleira, dentro da microbacia estudada, para estudo da produção de sedimentos utilizando o isótopo traçador (⁷Be). Logo abaixo da encosta na calha do Riacho já existia um vertedor triangular de parede espessa, e neste local foi construída uma fossa de sedimentação para a medição da de sedimentos em suspensão. Este local foi escolhido em virtude da topografia da bacia onde uma grande acumulação de sedimentos pelo assoreamento ocorria naturalmente nos períodos de recessão.

3.2. Monitoramento na fossa de sedimentação

3.2.1. Dispositivos para medições de precipitação e nível de d'água

Os dados de precipitação foram coletados no posto pluviométrico localizado na Microbacia Experimental, na coordenada 9.107.181 mN e 245.768 mE. Os dados de vazão foram obtidos através de um sensor de ultra-som instalado em um ângulo de 30° abaixo da linha do sensor na seção hidrossedimentológica instalada no exutório da microbacia, onde foram registrados as ocorrências de cada evento de vazão e produção de sedimentos, sendo os mesmos armazenados em um datalogger.

Desde instalação dos equipamentos em maio de 2009, estão sendo coletados regularmente (dados de chuva e lâmina escoada na seção de medição. Dentro do trecho da medição que inclui a fossa de sedimentos e a seção de amostragem de sedimentos em suspensão, foram instalados um sensor de ultra-som (Figura 7) para medição da vazão em um ângulo de 30° com o vertical, e um sensor de nível d'água (Figura 8). Os dois equipamentos foram instalados na seção do vertedor de parede espessa, e os dados de lâmina escoada, são armazenados num datalogger com bateria ligada a um painel solar. Foram instalados dois sensores de nível de água com os objetivos de tanto a verificação da falha num dos sensores quanto como a proteção contra a falha accidental total de um dos sensores. Para a utilização do vertedor, foi construída a curva-chave para esta seção através da coleta volumétrica do fluxo e sua medição.



Figura 7. Instalação do sensor de Ultra-som.



Figura 8. Instalação do sensor de nível.

3.2.2. Fossa de sedimentação para medição de sedimentos de arrasto e suspensão

A escolha do melhor local para a instalação da seção hidrossedimentológica foi baseado em um local que tivesse pequena influência abiótica e que possuíisse uma seção de controle, onde fosse possível construir uma seção para medição das descargas líquidas e sólidas em suspensão e de arrasto.

Para calcular os sedimentos de arrasto no curso d'água foi construído um dispositivo, uma fossa de sedimentação na seção hidrossedimentométrica. Os dispositivos para medição da produção de sedimentos estão instalados na seção hidrossedimentométrica localizada na coordenada 9.508.280 mN e 245.090 mE, que drena uma área de 58,7 ha e possui um perímetro de 4.097 m.

A fossa de sedimentação foi construída com o intuito de coletar os sedimentos oriundos da calha do Riacho (Figura 9 a 11). A determinação da produção de sedimentos de arrasto foi realizada a partir da medição da quantidade de sedimentos retidos na fossa de sedimentação, acrescido do material sólido que passou pelo vertedor da seção hidrossedimentométrica. Como esse é um riacho perene, algumas adaptações foram realizadas, como a construção de uma calha ligada a uma tubulação que desemboca a jusante do vertedor, que serve para armazenar os sedimentos que passam pelo vertedor. A coleta dos sedimentos na seção hidrossedimentométrica foi determinada utilizando um recipiente graduado para medir pequenas quantidades de

sedimentos. Para a medição de grandes volumes de produção de sedimentos, o monitoramento foi realizado com o auxílio de linhas verticais dispostas em toda a fossa, que permitiram a medição da profundidade dos sedimentos na caixa de sedimentação. Depois da determinação da quantidade de sedimentos, a caixa era esvaziada após cada evento chuvoso, para que pudesse reter sedimentos de outro evento. Para evitar o assoreamento da caixa de sedimentação, a calha era coberta com uma chapa galvanizada.



Figura 9. Fossa de sedimentação pronta para receber os eventos.



Figura 10. Fossa de sedimentação com acumulo de sedimentos, após um evento de precipitação médio.



Figura 11. Fossa de sedimentação com grande acumulo de sedimentos.

Para a fossa de sedimentação foi estabelecida uma tabela de altura de sedimentos e o volume acumulado para determinar a quantidade de sedimentos produzidos num evento chuvoso.

Na fossa de sedimentação foi levantada as medidas do volume da mesma (Figura 11) com o intuito de comparar o volume da caixa vazia com a quantidade de sedimentos da caixa após um evento chuvoso, determinando assim a quantidade de sedimento desprendido em um evento chuvoso na calha do rio.

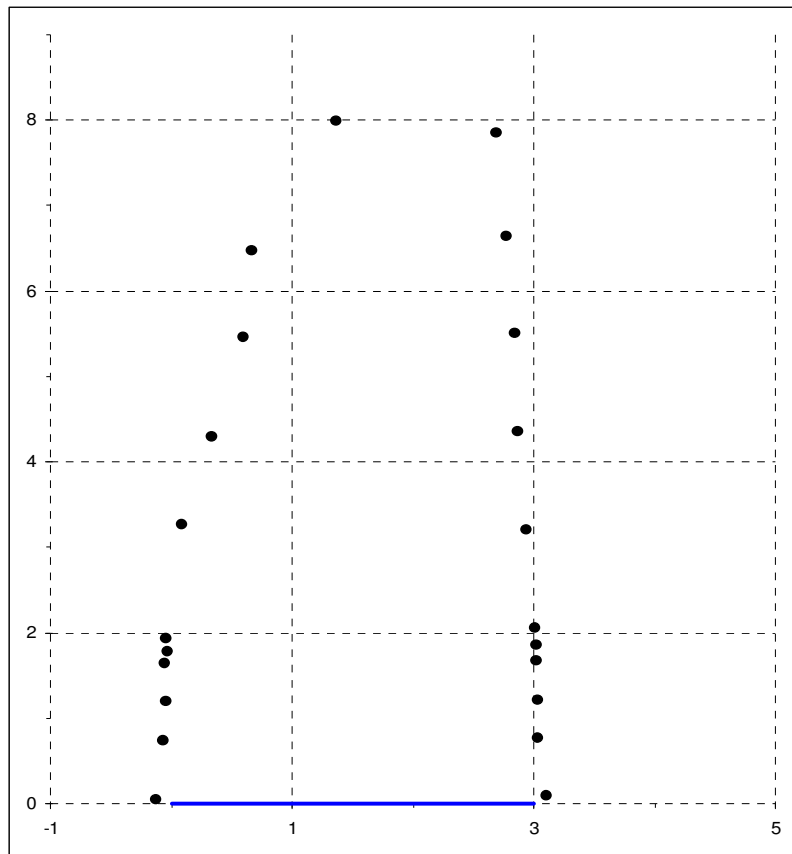


Figura 12. Medição da fossa de sedimentação.

Para mensurar os sedimentos em suspensão na seção hidrossedimentométrica foi instalado um dispositivo de amostragem e adaptado para as condições do riacho, devido ao fato do tempo de resposta da área de drenagem ser muito pequeno. Para analisar o desempenho do amostrador de sedimentos em suspensão, foram realizadas campanhas de medições dos sedimentos transportados em eventos chuvosos na bacia. O dispositivo foi um coletor de sedimentos em suspensão, constituído por uma torre de coleta automática de sedimentos do ramo ascendente do hidrograma, constituída por uma torre de 80 cm de altura, conectada por um conjunto de mangueiras a garrafas dispostas a cada 10 cm de elevação do nível. Essa seção está localizada nas coordenadas 9.508.280 mN e 245.090 mE, e drena uma área de 58,7 ha que possui um perímetro de 4.097 m.

A Figura 13 mostra detalhes do amostrador de sedimentos em suspensão e também das garrafas utilizadas para armazenar os sedimentos em suspensão carregados em cada evento de chuva (Figura 13A).

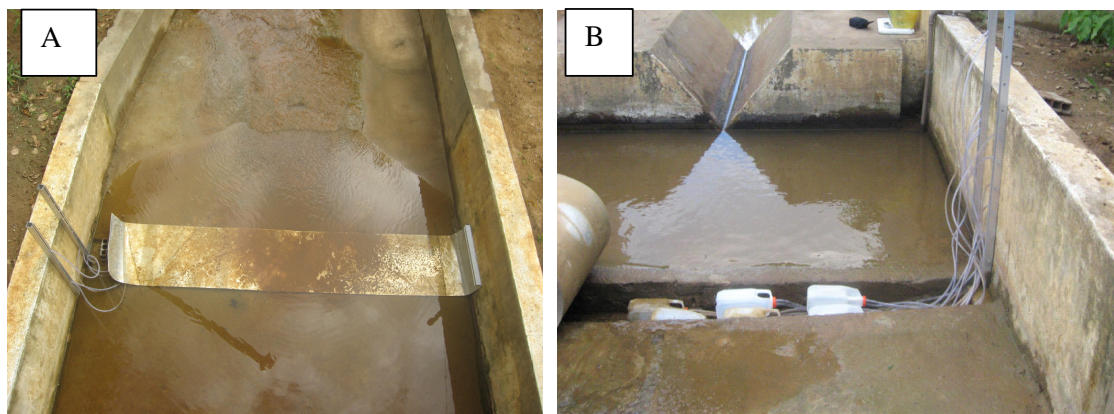


Figura 13. Fossa de sedimentação e detalhes do coletor de sedimentos em suspensão: (A) Chapa galvanizada que evita entrada de sedimento no canal. (B) Garrafas coletoras de sedimentos para coleta das amostras.

Como as garrafas inicialmente possuem ar, foi necessário colocar uma chapa sobre a calha de acomodação e fixá-la para que as garrafas ficassem no lugar e não flutuassem durante a passagem de onda de cheia o que impediria a entrada da mistura de água e sedimentos nas mesmas (Figura 13A). Cada garrafa possuía duas mangueiras, uma para entrada do escoamento com o sedimento em suspensão e a outra para saída do ar contido na garrafa (Figura 13B). As mangueiras de saída ficam acima das mangueiras de entrada, e também estão fixadas em uma base localizada atrás do suporte das mangueiras de entrada.

Assim, quando o nível do riacho alcança o nível da mangueira de entrada de uma determinada garrafa, ocorria o fluxo com o sedimento em suspensão para a garrafa expulsando o ar pela mangueira de saída. A variação das concentrações de sedimentos durante a passagem da cheia foi obtida através da determinação de concentração de amostras da mistura de água e sedimento no ramo ascendente da onda de cheia, em virtude do rio ter um fluxo perene e não se ter como fazer o desvio do mesmo.

3.2.2.1. Análise dos Dados em Laboratório

As coletas das amostras de sedimentos em suspensão foram realizadas logo após os eventos da chuva-deflúvio, para determinação da concentração total de sólidos em

suspensão no escoamento. O material sólido nas amostras foi determinado pelo método de filtração, utilizando-se papel do filtro num funil acoplado a um frasco Kitazato. Após o processo de filtração o material retido foi submetido à dessecação em estufa, mantida a 65°C, conforme recomendado por Task Committee (1969). Após a secagem, o material foi pesado em uma balança analítica, subtraindo-se o peso do papel. Em seguida foi obtida a concentração de sedimentos em suspensão por litro d'água amostrado (mg/l), calculando-se a descarga sólida (ton/dia), com base na descarga líquida (l/s). Neste trabalho considerou-se a concentração de sedimentos suspensos igual ao total de sólidos em suspensão, que é a massa de sólidos retidos por filtração, após a evaporação da água da amostra e pesagem do resíduo sólido, dividido pelo volume da amostra (Cantón et al., 2001).

Esses procedimentos foram feitos no Laboratório do Departamento de Energia Nuclear, da Universidade Federal de Pernambuco.

3.2.2.2. Determinação da Curva-Chave de Vazão

Logo após da instalação da seção hidrossedimentométrica foi estabelecida a curva-chave de vazão. Para a coleta de dados de nível de água, vazão e a velocidade média do escoamento na seção foram realizadas campanhas de medições diretas. As campanhas aconteceram durante o período chuvoso entre os meses de abril e agosto de 2010.

A curva-chave foi estabelecida com dados de vazão no intervalo entre 0,02 e 15 l/s. Em princípio, essa limitação da vazão deve-se ao comportamento hidrológico da bacia que apresenta um rápido decréscimo no escoamento poucas horas após o fim da precipitação, devido ao fato de grande parte da bacia ser constituída por solos de composição arenosa e com alta taxa de infiltração (Paiva *et al.*, 2010). Uma equação potencial foi ajustada a curva chave cuja forma está mostrada na Equação 1.

$$Q = 0,0053 \times (C + 2,59)^{2,53} \quad (1)$$

em que, C é a cota da lâmina de água (cm) e Q a vazão (l/s).

3.2.2.3. Determinação da Produção de Sedimentos em Suspensão

A concentração média de sedimentos em suspensão foi calculada pela relação entre a descarga sólida e a descarga líquida. Após a determinação da concentração de sedimentos no nível ascendente foram determinadas as produções de sedimentos em suspensão para cada evento chuvoso, conforme a equação (2):

$$Q_{ss} = \Sigma (Q \times C_{ss}) \times 0,0864 \quad (2)$$

sendo C_{ss} a concentração de sedimentos (mg L^{-1}), Q a descarga líquida ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$), e Q_{ss} a produção de sedimentos em suspensão ($\text{ton ha}^{-1} \text{dia}^{-1}$). A constante existente nesta equação é originada simplesmente pela conversão das unidades das variáveis em um sistema coerente de medidas.

Após a determinação da descarga sólida em suspensão para cada medição, foi traçada a curva-chave de sedimentos segundo metodologia apresentada por Lopes et al. (1981), Asselman (2000) e Carvalho (1994).

As curvas-chave de sedimentos possuem várias formas, entretanto, a mais utilizada é a função potencial que tem a forma indicada pela Equação 3:

$$C_{ss} = \alpha \times Q^\beta \quad (3)$$

sendo α e β coeficientes provenientes do ajuste aos dados observados.

O cálculo da descarga em suspensão foi feito considerando que o sedimento se movimentaria com a mesma velocidade da corrente em toda a seção transversal, ficando então igual ao produto da descarga líquida e a concentração média. Considerando que a Eq. 23 não é dimensionalmente homogênea, é necessário ajustar o valor do constante α adequadamente. Para este fim, as descargas sólidas em suspensão para cada medição foram calculadas utilizando os dados de vazão líquida e de concentração média de sedimentos em suspensão pela Equação 4.

$$Q_{ss} = \Sigma (Q \times C_{ss}) \times 0,0864 \quad (4)$$

sendo Q_{ss} a descarga sólida ou fluxo de sedimentos em suspensão (ton/dia), Q a vazão em (m^3/s). O fator numérico da multiplicação leva em conta a conversão do dia em segundos e mg em toneladas.

3.3. Análise dos teores de carbono (C), fósforo (P) e potássio (K) nos sedimentos colhidos na fossa de sedimentação

Para cada evento que gerou sedimentos, foi retirada 1 amostra de aproximadamente de 1 kg, de forma mais homogênea possível, retirando-se um pouco de solo em pontos equidistantes dentro da fossa de sedimentação, formando uma amostra composta, para serem analisadas em laboratório as concentrações dos nutrientes do solo depositados na fossa de sedimentação. Sendo eles: C, P e K. As amostras foram analisadas no Laboratório de Fertilidade do Departamento de Energia Nuclear da Universidade Federal de Pernambuco.

As amostras de carbono foram analisadas pelo método de Snyder e Trofymow, (1984), as de fósforo pelo método de Murphy e Riley, (1962) e o potássio pelo método de fotometria de chama, que é um método mais simples das técnicas analíticas utilizadas, é baseada em espectrometria atômica (Embrapa, 1999).

3.4. Modelagem hidrossedimentológica

O modelo hidrológico é uma das ferramentas que a ciência desenvolveu, para melhor entender e representar o comportamento da bacia hidrográfica e prever os resultados produzidos pela bacia em condições diferentes das observadas. A simulação é afetada pela heterogeneidade física da bacia e dos processos envolvidos, o que tem proporcionado o desenvolvimento de um grande número de modelos que se diferenciam em função dos dados utilizados, discretização, das prioridades da representação dos processos e dos objetivos a serem alcançados.

Dessa forma, uma análise do comportamento da geração do escoamento e erosão do solo, em diferentes escalas, trará subsídios valiosos para a análise do comportamento de parâmetros e de variáveis hidrológicas entre as escalas. Portanto, para uma análise do efeito de escala, torna-se necessária a utilização de ferramentas de simulação que considerem as heterogeneidades das bacias. Essas ferramentas de

simulação são os modelos hidrológicos distribuídos, como o WESP (Lopes, 1987), CHDM (Lopes, 1995), KINEROS2 (Woolhiser et al., 1990), WEPP (Flanagan e Nearing, 1995) e outros modelos mais complexos e sofisticados como o LISEM (de Roo, 1996) entre outros.

Para considerar características de variabilidade espacial dentro da bacia, os modelos distribuídos permitem que sejam definidas áreas ou zonas dentro da bacia que podem ser consideradas como homogêneas e, portanto representados por conjuntos de parâmetros ou características apropriadas para cada área homogênea. Desta forma, a distribuição espacial das variáveis e dos parâmetros é considerado no processo de modelagem ou a simulação Este tipo de modelo permite a utilização de dados de pluviometria, levando em consideração sua variabilidade espacial, sendo assim, mais representativa do real. Logo, é uma ferramenta que pode auxiliar também nos estudos da influência da variação do clima na bacia (Silva, 2005). No presente estudo foi utilizado o modelo KINEROS 2 para simular os processos hidrossedimentológicos.

Logo os procedimentos da modelagem envolvem diversas etapas, tais como: (a) preparação dos arquivos de dados, (b) calibração dos parâmetros do modelo, (c) validação dos parâmetros, e (d) Testes de aplicação. A Tabela 2 mostra os parâmetros físicos do solo utilizados na modelagem hidrossedimentológica. O KINEROS2 utiliza um conjunto de parâmetros de entrada que pode ser dividido em três grandes grupos: (a) parâmetros que podem ser determinados com base nas informações disponíveis na literatura, (b) parâmetros cujos valores podem ser medidos em campo ou no laboratório, (c) parâmetros cujos valores devem ser determinados pela calibração do modelo (a saturação inicial relativa do solo (S_i), coeficiente de impacto das gotas de chuva (c_f), e coeficiente de coesão do solo (c_o)).

Tabela 2. Parâmetros físicos do solo, utilizados pelo modelo KINEROS2 para a microbacia da Bacia Experimental Riacho Gameleira.

Parâmetros	Símbolo
Capilaridade média do solo	$G = 190 \text{ mm}$
Condutividade hidráulica saturada do solo	$K_s = 8,0 \text{ mm/h}$
Fração volumétrica de rocha	$R_o = 0,1$
Porosidade	$\phi = 0,398$
Espaçamento médio da microtopografia	$S_p = 0,1$

Altura da interceptação	$I_n = 0,25$
Fração da cobertura vegetal	$C = 0,1$
Coeficiente de rugosidade de Manning	$n \text{ (planos)} = 0,07$
	$n \text{ (canais)} = 0,0002$
Saturação inicial relativa do solo	$S_i = 0,32$
Coeficiente de impacto das gotas de chuva	$c_f = 4780977,136$
Coeficiente de coesão do solo	$c_o \text{ (planos)} = 0,01$
	$c_o \text{ (canais)} = 0,0001$

Para a aplicação do modelo KINEROS2 a uma bacia hidrográfica a transformação de sua área de vertente em elementos planos retangulares e os seus cursos de água em canais trapezoidais é requisito fundamental levando em consideração à topografia e toda a rede de drenagem. Esta representação e o número de elementos a ela associada é bastante crucial para que os resultados do modelo sejam coerentes com os valores observados e precisos.

A saturação relativa inicial do solo (S_i), dada pela divisão entre a umidade inicial relativa do solo e a porosidade do solo (θ_i/ϕ), varia de evento a evento e foi determinada neste estudo por calibração pelo método de tentativa e erro, ajustando o valor da saturação até que o escoamento simulado chegar ao valor mais próximo possível do observado, para cada evento simulado. A produção total de sedimentos medida na fossa de sedimentação foi utilizada para calibrar os parâmetros do solo ligados ao processo da erosão da forma semelhante. Estes parâmetros foram: o parâmetro c_f , relativo ao cálculo da erosão por impacto das gotas de chuva e o de coesão do solo (c_o). A qualidade de resultados simulados foi avaliada através dos coeficientes de determinação R^2 e de Nash-Sutcliffe, comparando os valores simulados com os observados.

Gelfan (2005) relatou como um modelo de base física foi parametrizado e calibrado para uma bacia pequena, e os parâmetros do modelo obtidos foram considerados como regionais. Estes parâmetros foram transferidos para uma outra bacia, com apenas duas estações de medição do escoamento, e os resultados obtidos foram satisfatórios. Em geral, pode não ser prudente considerar apenas uma pequena bacia como uma unidade típica representante de uma região e transferir livremente os seus parâmetros para outras bacias. Por exemplo, Solé-Benet et al. (2003) realizaram um monitoramento por um longo período em duas microbacias no sudeste da Espanha.

Relataram a grande influência de escala e dos tipos de solo, resultando em diferenças significativas na lâmina escoada e na erosão dos solos.

A existência dos parâmetros regionais para um modelo hidrossedimentológico é uma hipótese, que implica na possibilidade de simular satisfatoriamente, diversas bacias dentro de uma região hidrologicamente homogênea, com um único conjunto dos parâmetros. Esta idéia também implica na portabilidade de parâmetros calibrados numa bacia para outra com características semelhantes dentro da mesma região. Com o intuito de verificar a portabilidade dos parâmetros *cf* e *co* nas duas bacias experimentais, foram realizadas simulações com os parâmetros médios regionais obtidos pela média dos parâmetros de BERG e BESJC, com este conjunto único de parâmetros. Vale salientar que a saturação inicial calibrada em cada evento foi mantida para simular o escoamento corretamente. A qualidade dos resultados da produção de sedimentos foi verificada por meio dos coeficientes de determinação R^2 entre os valores simulados e os valores observados nos eventos. Diante dos bons resultados obtidos, foi possível pensar na possibilidade de estabelecer um único conjunto de parâmetros aplicáveis para as duas bacias e por extensão, para outras bacias na mesma região. Os valores médios de *cf* e *co*, de todas as unidades calibradas nas duas bacias foram considerados como a melhor estimativa deste conjunto. A qualidade da simulação em cada caso foi avaliada como anteriormente, pelos coeficientes de determinação R^2 e o fator de eficiência de Nash-Sutcliffe.

3.4.1. Uma descrição geral do Modelo KINEROS2

Este modelo, KINEROS, inicialmente surgiu pela incorporação dos componentes de erosão, transporte e deposição ao modelo hidrológico de Rovey et al. (1977). Neste modelo de Rovey et al. 2007, a infiltração foi modelada para o cálculo da chuva excedente. A inclusão de novos componentes na simulação da erosão e transporte de sedimentos e a revisão do componente de infiltração, levou a criação do modelo KINEROS2. Este possui novas características, tais como: (a) o algoritmo de infiltração que 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.

Uma descrição mais detalhada sobre as equações do modelo pode ser encontrada em Woolhiser et al. (1990), Smith et al. (1995) e Semmens et al. (2008). O KINEROS2 vem sendo aplicado em diversas bacias em regiões de clima semiárido, como nos estudos de Michaud e Sorooshian (1994), Santos et al. (2001), Kalin et al. (2003), Martínez-Carreras et al. (2007) e Al-Qurashi et al. (2008). Nos últimos anos, o KINEROS2 tem sido utilizado em diversos estudos em bacias experimentais na região semiárida do Nordeste do Brasil, como nos trabalhos de Srinivasan et al. (2007 e 2009), Paiva et al. (2007) e Santos et al. (2007).

Componente de Infiltração

O componente de infiltração utilizado no KINEROS2 permite uma redistribuição de água no solo, incluindo a recuperação da capacidade de infiltração durante os intervalos sem precipitação, permitindo o cálculo das taxas de infiltração durante e após esse intervalo sem chuva. A taxa de infiltração, f_c , é uma função da lâmina acumulada de infiltração, I , e de alguns outros parâmetros básicos que descrevem as propriedades de infiltração no solo como: condutividade hidráulica saturada efetiva K_s (m/s), valor efetivo do potencial de capilaridade, G (m), porosidade do solo ϕ , e índice de distribuição dos tamanhos dos poros λ . Há também um parâmetro opcional, (C_v) , que descreve a variação aleatória espacial da condutividade hidráulica saturada do solo, assim como um parâmetro que representa a porcentagem de rochas, $ROCK$. Utiliza-se também uma variável da saturação relativa inicial do solo, S_i (m³/m³), cujo valor é dado por θ_i/ϕ , onde θ_i é o índice de umidade inicial do solo. O cálculo da taxa de infiltração f_c (m/s) é feito pela seguinte equação (Smith e Parlange, 1978):

$$f_c = K_s \left[1 + \frac{\alpha}{e^{\alpha I/B} - 1} \right] \quad (5)$$

onde $B = (G + h)(\theta_s - \theta_i)$, 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 θ_s é o umidade de saturação do solo (m³/m³). O parâmetro α representa o tipo de solo; α se aproxima de 0 para areia, e neste caso, a Eq. (1) aproxima-se da equação de Green-Ampt; α se aproxima de 1 para um solo franco

bem uniforme, neste caso a Eq. (5) representa a equação de infiltração de Smith-Parlange (Smith e Parlange, 1978). Sugere-se que a maioria dos tipos de solo é melhor representada por um valor de α igual a 0,85, sendo este o valor adotado no modelo (Smith et al., 1993).

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

$$G = \int_{-\infty}^0 \frac{K(\Psi)}{K_s} d\Psi \quad (6)$$

onde Ψ é o potencial mátrico do solo (m).

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 condutividade hidráulica do solo do solo. A equação utilizada no modelo para o cálculo da variação da umidade do solo nestes períodos é:

$$\frac{d\theta_0}{dt} = \frac{\Delta\theta_{i0}}{I} \left[r - K_i - \left(K(\theta_0) + \frac{\beta p K_s \Delta\theta_{i0} G(\theta_i, \theta_0)}{I} \right) \right] \quad (7)$$

onde:

$\Delta\theta_{i0} = \theta_0 - \theta_i$ é 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 condutividade do solo K_s , negativa (devido à evaporação) ou zero;

$$\beta = \frac{1}{Z(\theta_0 - \theta_i)} \int_0^Z (\theta - \theta_i) dz = 0,85 \text{ é um fator de forma;}$$

Z é a profundidade da frente de molhamento;

p é um fator efetivo de profundidade ($p = 2$ para $r = 0$; $p = 1,5$ para $0 < r < K_s$; $p = 3$ para $r < 0$); e

$G(\theta_i, \theta_0)$ é o valor efetivo do potencial de capilaridade na frente de redistribuição de água (m).

Nestes períodos, onde a umidade do solo está abaixo da umidade de saturação, a equação utilizada para calcular a condutividade hidráulica do solo é (Brooks e Corey, 1964):

$$K(\theta) = K_s \left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)^{3+2/\lambda} \quad (8)$$

onde:

θ é a umidade do solo no período de redistribuição de água;

K_s é a condutividade do solo efetiva do solo (m/s);

θ_r é a umidade residual do solo;

θ_s é a umidade do solo na saturação; e

λ é o parâmetro de distribuição do tamanho dos poros (parâmetro de Brooks e Corey).

Maiores detalhes sobre o modelo de redistribuição de água no solo, utilizado no modelo KINEROS2, podem ser obtidos em Smith et al. (1993).

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 governado pelas equações de Saint-Venant. As simplificações das equações de Saint-Venant, para o caso de uma onda cinemática, não preservam todas as suas propriedades, tais como as utilizadas em modelos difusos. Os modelos de difusão consideram os efeitos de jusante sobre o escoamento proveniente de montante, e como nos modelos hidrodinâmicos, consideram as equações de Saint-Venant em sua forma geral, incluindo os termos que representam a gravidade, o atrito, a pressão e a inércia do fluxo (Woolhiser et al., 1990). Mesmo assim, o modelo utiliza o

conceito da onda cinemática em que a equação da quantidade de movimento das equações de Saint Venant se simplifica para a forma:

$$Q = ah^m \quad (9)$$

Em que, Q é a descarga por unidade de largura (m^2/s) e h é o volume de água armazenado por unidade da área (m). Os parâmetros a e m são dados por: $a = S^{1/2}/n$ e $m = 5/3$, S é a declividade e n é o coeficiente de rugosidade de Manning.

A Eq. (10) é utilizada juntamente com a equação da continuidade:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q(x,t) \quad (10)$$

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

Substituindo, a Eq. (11) para Q na Eq. (6), se obtém:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + amh^{m-1} \frac{\partial h}{\partial x} = q(x,t) \quad (11)$$

As equações de onda cinemática são resolvidas no modelo Kineros usando um esquema implícito de diferenças finitas definido em quatro pontos, em relação à distância e ao tempo.

Condições de Fronteira

A profundidade de fluxo na fronteira a montante dos elementos deve ser especificada para solucionar a Eq. (12). Se essa fronteira fizer parte do divisor de águas da bacia, a condição de fronteira será:

$$h(0,t) = 0 \quad (12)$$

Se um plano estiver contribuindo a montante para outro plano, a condição de fronteira será:

$$h(0,t) = \left[\frac{a_u h_u(L,t)^{m_u} W_u}{aW} \right]^{\frac{1}{m}} \quad (13)$$

onde $h_u(L,t)$ é a profundidade na fronteira inferior do plano contribuinte no tempo t , L é o comprimento e W_u é a largura do plano contribuinte, a_u é o parâmetro declividade/rugosidade do plano contribuinte, m_u é um expoente referente ao plano contribuinte, e a , m e W são referentes ao plano a jusante.

Recessão e Microtopografia

A microtopografia do relevo pode ter grande importância na forma do hidrograma (Woolhiser et al., 1996). O efeito é mais pronunciado durante a recessão, quando a parte do solo coberta pelo fluxo de água determina a oportunidade para a perda de água pela infiltração. O modelo trata este relevo supondo que na sua geometria existe uma elevação máxima, e que a área coberta por água varia linearmente com a diferença entre este valor e o nível de água. A geometria da microtopografia é determinada especificando dois parâmetros que representam o espaçamento médio (parâmetro *spacing*) entre os picos e o valor médio (parâmetro *relief*) desses picos nessa microtopografia.

Fluxo nos Canais

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

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q(x,t) \quad (14)$$

onde A é a área da seção transversal (m^2), Q é a vazão no canal (m^3/s), e o $q(x,t)$ é o fluxo lateral por unidade de comprimento do canal (m^2/s). A relação entre a vazão no canal e a área de sua seção após a simplificação da onda cinemática é dada por:

$$Q = aR^{m-1} A \quad (15)$$

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

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

Modelagem da Erosão nos Planos e Canais

A equação geral que descreve a dinâmica dos sedimentos no fluxo é a equação de balanço de massa, similar àquela para o fluxo de água (Bennett, 1974):

$$\frac{\partial(AC_s)}{\partial t} + \frac{\partial(QC_s)}{\partial x} - e(x,t) = q_s(x,t) \quad (16)$$

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 depositar 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 :

$$e = e_s + e_h \quad (17)$$

A erosão por impacto das gotas de chuva é estimada pela seguinte expressão (Meyer e Wischmeier, 1969):

$$e_s = c_f e^{-c_h h} t^2 \quad (18)$$

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. 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:

$$e_h = c_g (C_m - C_s) A \quad (19)$$

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 (s^{-1}), e é calculado por:

$$c_g = c_o \frac{v_s}{h} \text{ se } C_s \leq C_m \text{ (erosão) ou } c_g = \frac{v_s}{h} \text{ se } C_s > C_m \text{ (deposição)} \quad (20)$$

onde 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 Kíneros utiliza a fórmula de capacidade de transporte de Engelund e 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 Engelund e Hansen, (1967):

$$C_m = \frac{0,05}{d(S_s - 1)^2} \sqrt{\frac{Sh}{g}} (\Omega - 0,004) \quad (21)$$

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:

$$v_s^2 = \frac{4}{3} \frac{g(S_s - 1)d}{C_D} \quad (22)$$

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

$$C_D = \frac{24}{R_n} + \frac{3}{\sqrt{R_n}} + 0.34 \quad (23)$$

onde R_n é o número de Reynolds, calculado como $R_n = v_s d / \nu$, onde ν é a viscosidade cinemática da água. A velocidade de queda da partícula é encontrada resolvendo simultaneamente as equações (16) e (17).

A simulação do transporte de sedimentos nos 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. Aplicação da técnica de isótopos traçadores para quantificar a produção de sedimentos em uma encosta

A técnica que utiliza o isótopo traçador (^7Be) para avaliar os padrões de erosão, transporte e deposição de sedimentos consiste na comparação do inventário do isótopo em locais pré-selecionados da bacia com o inventário medido em áreas de referência, nas quais se admite não haver erosão ou deposição ou que a movimentação de solo seja insignificante. Para a aplicação desta técnica foram seguidas as etapas:

3.5.1. Construção do amostrador e um fatiador de solo, aquisição e preparo das amostras de solo

Para se obter as amostras de solo, foi utilizado um amostrador de PVC de diâmetro cilíndrico de 10 cm e 4 cm de profundidade (Figura 14). As dimensões do amostrador foram desenvolvidas em virtude de ser necessário camadas de 2 mm de solo, pois o ^7Be encontra-se em camadas muito superficiais do solo, observando-se em

estudos anteriores que é encontrado até uma 2 cm de solo e que sua concentração varia muito em camadas muitas finas de até 2 mm de solo. Em virtude de tudo isso que foi descrito anteriormente foi necessário construir um equipamento que fatiasse o solo em camadas de 2 mm.

Um dispositivo especial foi construído para realizar o fatiamento das camadas de solo em 2 mm de solo, o fatiador de solo (Figuras 14 a 17). Mecanismo acoplado a um parafuso, o qual quando girar uma volta ou completar 360° a amostra avança por 2 mm fornecendo uma amostra de 2 mm de solo. Em seguida o solo foi recortado utilizando uma espátula, para ser feito a extração do mesmo.



Figura 14. Amostrador de solo.

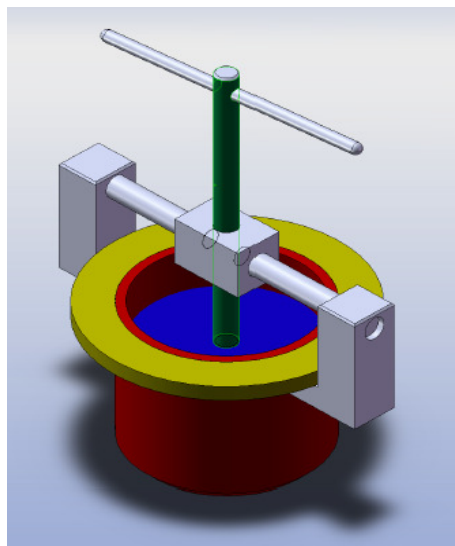


Figura 15. Fatiador de solo.



Figura 16. Fatiador do solo.



Figura 17. Execução do fatiamento do solo.

Para a área de estudo da erosão e deposição de solo foi escolhida uma encosta que contribui para a calha da microbacia em estudo. Foi delimitada uma parcela com 10 m de largura e 40 m de comprimento com relevo bastante acidentado, para as retiradas das amostras de solo, utilizando o mesmo processo já descrito em Blake et al., (1999). Foram utilizados 6 pontos equidistantes para formar uma área homogênea e realizar-se a análise de cada ponto e fazer uma média dos quantidades identificadas em cada camada dos pontos amostrados, para área de topo ou área de referência, área da encosta de erosão e a área de deposição no final da encosta. Onde em cada ponto serão retiradas 5 camadas de solo de 2 mm, para determinar a quantidade de ^7Be em cada uma delas.

Como local de referência, para determinar o perfil de distribuição vertical de ^7Be no solo (ou o inventário de ^7Be no solo), foi escolhida em uma área relativamente plana sem perturbação, sem evidência de erosão ou deposição de solo. Nestes locais da referência escolhidos, foram retirados cinco fatias de 2 mm em cada ponto, num total de 6 pontos. Para cada ponto foi obtida a média de concentração de ^7Be a partir das

amostras individuais em cada ponto. O mesmo procedimento foi realizado para as amostras obtidas e nas áreas de erosão nas encostas e na área de deposição do solo. Após determinada esta quantidade, pode-se estudar o quanto o solo erodiu ou depositou em cada ponto amostrado pelo carregamento do ^7Be nas camadas de solo que se movem, utilizando este valor médio de referência.

Em seguida calculamos a concentração do ^7Be na área da erosão na encosta e também na área de deposição. Comparando os valores obtidos seria possível avaliar o valor médio de solo erodido e depositado nas áreas onde foram tiradas as amostras.

3.5.2. Determinação no laboratório da concentração de ^7Be no solo

3.5.2.1. Sistema de medidas

No Laboratório de Instrumentação Nuclear do Departamento de Energia Nuclear da Universidade Federal de Pernambuco, existem quatro conjuntos de equipamentos de medidas gamas, entre esses, três fabricados pela Canberra[®] e um da marca Ortec[®], os quais foram utilizados para determinar radionuclídeos naturais e antropogênicos no meio ambiente, utilizando-se da análise não destrutiva pela técnica de espectrometria gama (Araújo Filho, 2009).

Dois dos sistemas de medidas são compostos por detectores do tipo germânio hiperpuros (HPGe - High purity Germanium de alta resolução, e os outros dois, por cristais inorgânicos de iodeto de sódio ativado com tálio, NaI (Tl). Este estudo permitiu observar que o HPGe é o detector que apresenta maior resolução em energia, portanto, indicado para o arranjo experimental padronizado na faixa de energia considerada para as análises desses radionuclídeos.

Em qualquer tipo de análise envolvendo a técnica de espectrometria gama, faz-se necessário, uma avaliação completa dos parâmetros relacionados ao sistema de medidas adotado no arranjo experimental. Entre os parâmetros estudados estão: as curvas de eficiências e as eficiências de contagens. Estes parâmetros fornecem maior confiabilidade nos cálculos das atividades específicas, dos teores e da estimativa da dose de radiação gama natural realizado nesse estudo.

Para as medidas do ^7Be , o arranjo experimental foi composto basicamente de um sistema de medidas com detector HPGe, de fabricação da Canberra[®] do tipo BeGe

(Broad Energy Germanium), com 4,54 cm de diâmetro externo e volume ativo de 41,1 cm³ (Figura 18). O detector apresenta uma resolução de 1,77 keV (largura do pico a meia altura) para a energia de 1.332 keV do ⁶⁰Co, eficiência nominal de 27,7% e está acoplado a um pré-amplificador modelo 2002 CSL MCA (multichannel analyzer) com 8.192 canais e software Genie®-2000 Canberra®. A tensão de operação do pré-amplificador foi ajustada em 3 kV, conforme especificação do fabricante (Araújo Filho, 2009).

Para reduzir os efeitos da interferência do BG (background), o detector foi envolvido por uma blindagem de Pb com baixa radiação de fundo de aproximadamente 6,5 cm de espessura e uma superfície interna delgada constituída de uma liga de Cu e Zn, de forma a minimizar os efeito secundários.

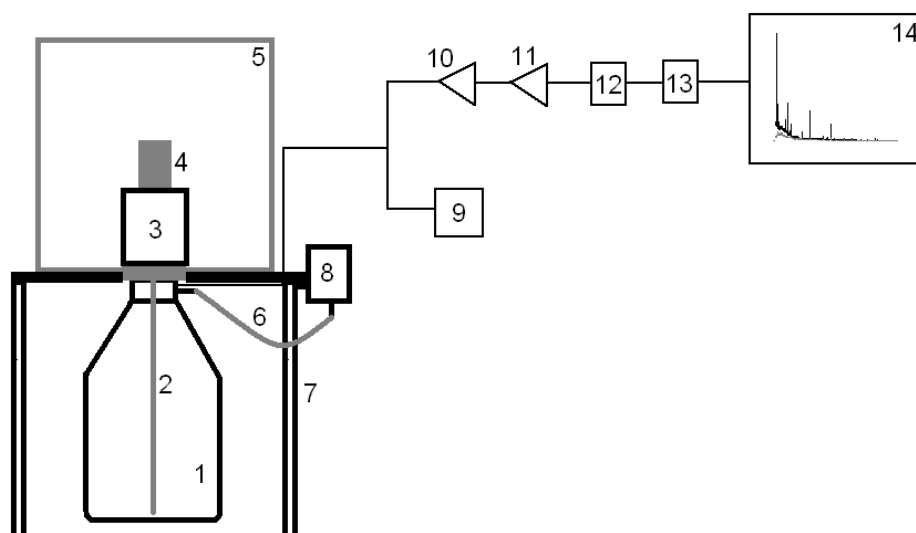


Figura 18. Sistema de medidas. (1-Recipiente para N₂(l); 2-Haste de Cu para resfriamento do HPGe; 3-Detector HPGe; 4-Amostra em recipiente de polietileno; 5-Blindagem de Pb; 6-Mangueira para transferência de N₂(l); 7-Suporte da blindagem de Pb; 8-Alimentador de N₂(l); 9-Alta tensão do pré-amplificador; 10-Pré-amplificador; 11-Amplificador; 12-ADC; 13-MCA; 14-Sistema computacional) (Fonte: Araújo Filho, 2009).

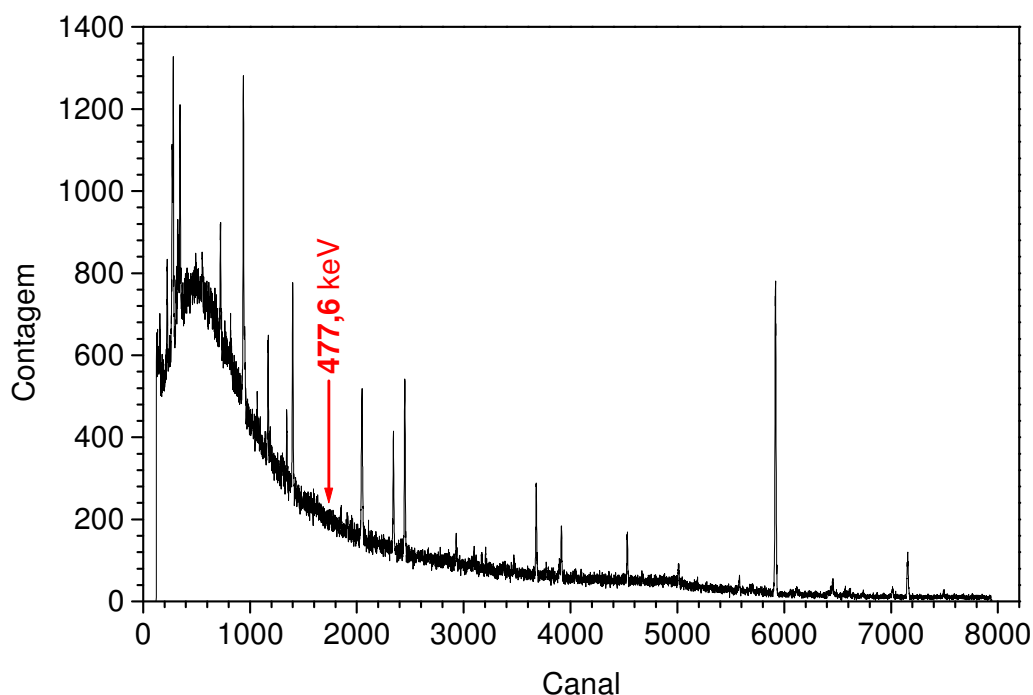
3.5.2.2. Eficiências de contagens dos padrões

As análises de isótopos foram realizadas no DEN - Departamento de Engenharia Nuclear da UFPE, local que possui laboratórios e equipamentos especializados para realizar as análises, utilizando as instalações para a determinação da atividade específica do ⁷Be que foi medida por espectrometria gama num detector tipo germânico HPGe de

alta resolução. As contagens realizadas pelo detector, para determinar a quantidade de ^7Be em cada amostra, foram realizadas num espaço de tempo de 48 horas (172800 s). Este tempo foi determinado em função da maior precisão nas contagens, devido às baixas concentrações de ^7Be nas amostras analisadas (Fraga e Salcedo, 2004).

Todas as amostras de solo, antes de serem contadas no detector, foram secas ao ar, e depois colocadas em estufa a 65°C para retirada total da umidade. Posteriormente, as amostras foram passadas na peneira de 2 mm de abertura para serem homogeneizadas. Logo após passarem pelo processo de contagem por espectrometria gama, os espectros foram analisados através do software Genie 2000 (Canberra Indústrias) (Figura 19).

A figura 19 apresenta a contagem de um de nossas amostras, mostrando o local onde se encontra o pico de energia do ^7Be que é 477,6 keV. É nítida a dificuldade de se identificar a atividade deste isótopo, quase não se observa o pico, diferente de outros elementos que facilmente se identificam, sendo encontrados em grande quantidade nesta amostra analisada.



F

Figura19. Espectro gama para amostra de solo (camada superficial de 2 mm do topo da encosta).

Para os cálculos das eficiências de contagens foram estabelecidos alguns critérios para maior confiabilidade dos resultados: utilização de padrões certificados (devidamente adequados para as faixas de energias em estudo); diluição dos padrões diretamente em matrizes com densidades semelhantes às densidades das amostras analisadas; padronização das geometrias dos recipientes e de contagem (posicionamento no detector); uniformização dos volumes das amostras nos recipientes e do tempo de contagem. Foram calculadas as eficiências de contagens para a determinação do ^7Be , (equação 25).

$$\varepsilon_E = \frac{N_{Ei}}{A_{Eip} \times t \times \gamma_p \times V_p} \quad (25)$$

Assumindo que ε_E representa a eficiência de contagem, determinada com base na curva de eficiência; N_{Ei} a área líquida de cada fotopico, determinada experimentalmente em contagens; A_{Eip} a atividade específica gama do padrão corrigida; t o tempo de contagem (s); γ_p a abundância gama do padrão para a energia em consideração e V_p o volume do padrão (mL).

Diversos métodos analíticos, entre eles, espectrometria alfa, cintilação líquida e espectrometria de massa, são tradicionalmente utilizados para a determinação de baixos níveis de radionuclídeos naturais ($< 10^3 \text{ pg.g}^{-1}$), porém com custos adicionais e processos químicos trabalhosos na preparação das amostras (PAPACHRISTODOULOU et al., 2003). Como alternativa, é utilizada a espectrometria gama que é uma técnica radioanalítica bastante difundida e utilizada para qualificação e quantificação de radionuclídeos, principalmente em amostras ambientais, nas quais geralmente a radioatividade é baixa (MALANCA et al., 1993; RÓDENAS et al., 2003; SUJO et al., 2004). Atualmente, utiliza-se com maior frequência detectores de HPGe, devido às suas vantagens operacionais. Uma das principais vantagens dessa técnica é a quantidade de informações obtidas em uma única análise. Além disso, é um método rápido, multielementar e não destrutivo, embora menos sensível que os métodos radioquímicos tradicionais. O método pode ser considerado absoluto e relativo, porém, para aplicação do método absoluto, é necessária a construção de uma curva de eficiência (ε), pois em espectrometria gama a determinação exata da eficiência de contagem é o

problema chave para medidas de radionuclídeos. Isto principalmente, com relação à escolha da fonte padrão adequada (BOLIVAR et al., 1996), que deve levar em consideração alguns parâmetros, tais como, densidade semelhante às amostras de atividades desconhecidas, minimizando assim, a influência do efeito da auto-absorção.

CAPÍTULO 4

Resultados e Discussões

4.0. RESULTADOS OBTIDOS

4.1. Aquisição de dados de produção de sedimentos

4.1.1. Estabelecimento da curva chave de Vertedouro

Após a instalação da seção hidrossedimentométrica foi necessário estabelecer a curva-chave para a vazão. Para a coleta de dados referente aos níveis de água, às vazões correspondentes e à velocidade média do escoamento na seção de medição, foram realizadas campanhas de medições diretas. As campanhas aconteceram durante o período chuvoso entre os meses de abril e agosto de 2010.

A Figura 20 apresenta a curva-chave do posto hidrossedimentométrico na microbacia da Bacia Experimental do Riacho Gameleira. A curva-chave de vazão encontrada obteve um coeficiente de determinação (R^2) igual a 0,99.

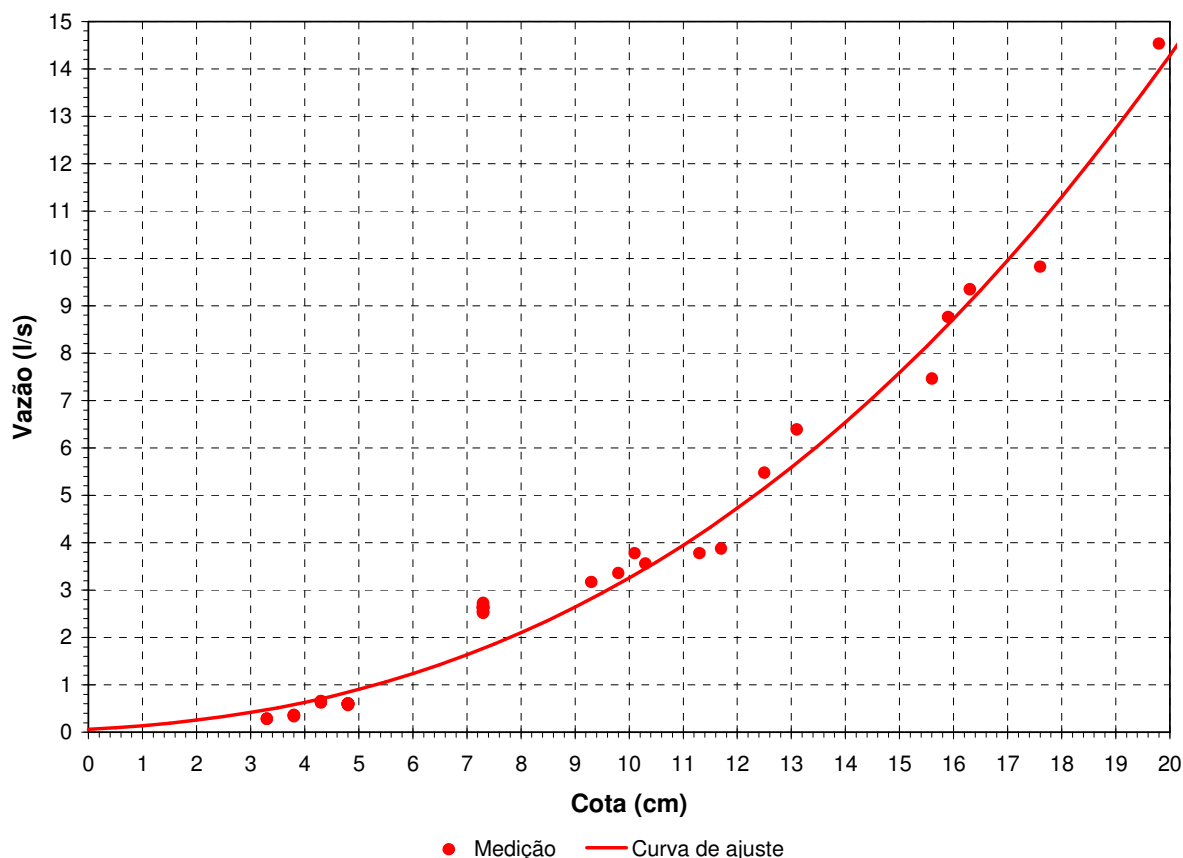


Figura 20. Curva-chave do posto hidrossedimentométrico no Riacho Gameleira.

4.1.2. Produção de sedimentos em suspensão e arrasto

Os valores de produção de sedimentos observados apresentaram uma variação consistente entre os eventos registrados, e as 430 ton de sedimentos acumulados no período chuvoso de 2010 e 2011 (Tabela 3), correspondem a uma perda média de 7,33 ton ha⁻¹.ano⁻¹. Dessa forma, as produções de sedimentos registradas podem ser consideradas como dentro do limite tolerável para os solos da região que, de acordo com Campos Filho et al. (1991), é da ordem de 3 a 10 ton ha⁻¹.ano⁻¹.

Verificou-se que nos eventos mais intensos e com maior produção de sedimentos, a deposição ao longo do percurso foi muito pequena, sendo praticamente todo o sedimento desprendido carregado para o exutório da microbacia. Um bom exemplo é o evento do dia 17/6/2010, aonde aproximadamente 90% da produção de sedimentos de arrasto chegou ao exutório com 1441,5 kg/ha.

Tabela 3. Valores de precipitação e produção de sedimentos estimada na microbacia da BERG.

Cheia	Data	Chuva (mm)	Produção de sedimentos (ton/ha)
1	04/06/2010	47,2	0,116
2	16/06/2010	64,0	0,147
3	17/06/2010	142,5	0,342
4	20/06/2010	71,6	0,351
5	23/06/2010	45,7	0,791
6	27/06/2010	27,9	0,213
7	30/06/2010	31,8	0,031
8	09/07/2010	25,7	0,093
9	13/07/2010	16,3	0,093
10	18/07/2010	7,8	0,358
11	21/07/2010	6,6	0,326
12	28/07/2010	7,5	0,211
13	07/08/2010	32,0	0,120
14	10/08/2010	17,8	0,176
15	22/08/2010	14,0	0,220
16	02/09/2010	14,5	0,358
17	15/09/2010	10,5	0,165
18	11/01/2011	15,8	0,056
19	26/01/2011	16,0	0,025
20	21/02/2011	11,3	0,016
21	26/02/2011	43,3	0,149
22	27/02/2011	22,5	0,282
23	11/03/2011	27,1	0,042
24	09/04/2011	27,0	0,171
25	12/04/2011	32,8	0,217
26	13/04/2011	25,0	0,178
27	18/04/2011	22,5	0,133
28	19/04/2011	41,50	0,242
29	21/04/2011	35,30	0,063
30	30/04/2011	19,90	0,018
31	01/05/2011	15,70	0,012
32	02/05/2011	18,70	0,013
33	03/05/2011	85,80	0,311
34	04/05/2011	78,6	0,146
35	05/05/2011	108,00	0,241
36	20/05/2011	82,00	0,301
37	24/05/2011	34,00	0,140
38	04/06/2011	11,50	0,053
39	05/06/2011	10,10	0,032
40	12/06/2011	10,80	0,017
41	13/06/2011	7,60	0,009

42	17/06/2011	59,00	0,114
43	18/06/2011	13,30	0,024
44	22/06/2011	13,60	0,013
45	03/07/2011	25,50	0,027
46	06/07/2011	36,00	0,131
47	12/07/2011	12,00	0,010
48	13/07/2011	15,5	0,011
49	16/07/2011	15,3	0,012
50	17/07/2011	24,0	0,017
Total			7,333

A Tabela 4 apresenta os eventos da cheia registrados em 2010 e 2011 com os valores da precipitação total de cada evento, as descargas líquidas (Q em m^3/s), a concentração de sedimentos (C_{ss} em mg/l), a descarga de sedimentos suspensos (Q_{ss} em $t/ha.dia$) obtidos para a seção e os dados médios com os quais se traçou a curva chave para o amostrador. Nota-se que as faixas de variação são: para a precipitação de 6 a 145 mm/dia , para a vazão média de 0,003 a 0,020 m^3/s , e para a concentração de sedimentos em suspensão de 0,048 a 22,9 mg/l .

A partir dos dados coletados no amostrador de sedimentos em suspensão, foram calculados os valores médios da produção de sedimentos em suspensão para cada cota.

Pode-se observar que em apenas metade dos eventos o escoamento foi igual ou superior a lâmina de 30 cm , e em apenas 2 eventos foi atingida a lâmina de 40 cm . Nota-se que a concentração de sedimentos em suspensão acompanhou a tendência do escoamento superficial na maioria dos eventos, a produção de sedimentos aumentando com a vazão, embora na forma não linear.

Tabela 4. Valores de precipitação total, lâmina escoada, concentração de sedimentos em suspensão, e produção de sedimentos estimada na microbacia da BERG.

Data	Chuva (mm)	Nível de água (cm)	Q (m^3/s)	C_{ss} (mg/l)	Q_{ss} (t/ha.dia)
4/6/10	47,2	10	0,0033	1,50	0,0004
14/6/10	64,0	10	0,0033	1,90	0,0005
		20	0,0141	3,10	0,0038
16/6/10	64,0	10	0,0033	2,20	0,0006
		20	0,0141	3,10	0,0038
		30	0,0161	3,70	0,0051
17/6/10	142,5	10	0,0033	4,30	0,0012
		20	0,0141	6,50	0,0079
		30	0,0161	13,90	0,0193

		40	0,0184	18,70	0,0297
		50	0,0203	22,90	0,0402
20/6/10	71,6	10	0,0033	0,90	0,0003
		20	0,0141	1,90	0,0023
		30	0,0161	2,60	0,0036
27/6/10	27,9	10	0,0033	1,20	0,0003
		20	0,0141	1,90	0,0023
30/6/10	31,8	10	0,0033	0,80	0,0002
		20	0,0141	1,50	0,0018
		30	0,0161	2,40	0,0033
9/7/10	25,7	10	0,0033	1,90	0,0005
13/7/10	16,3	10	0,0033	2,30	0,0007
		20	0,0141	3,80	0,0046
28/7/10	7,5	10	0,0033	0,23	0,0001
7/8/10	32,0	10	0,0033	0,56	0,0002
		20	0,0141	1,20	0,0015
		30	0,0161	1,90	0,0026
		40	0,0184	2,30	0,0037
10/8/10	17,8	10	0,0033	0,10	0,0000
		20	0,0141	1,56	0,0019
		30	0,0161	2,30	0,0032
22/8/10	14,0	10	0,0033	0,05	0,0000
2/9/10	14,5	10	0,0033	2,50	0,0007
		20	0,0141	3,90	0,0048
		30	0,0161	5,70	0,0079
11/1/11	15,8	10	0,0033	0,05	0,0000
		20	0,0141	0,07	0,0001
26/1/11	16,0	10	0,0033	0,09	0,0000
		20	0,0141	0,15	0,0002

Tabela 4. Continuação dos valores de precipitação total, lâmina escoada, concentração de sedimentos em suspensão, e produção de sedimentos estimada na microbacia da BERG.

21/2/11	11,3	10	0,0033	0,05	0,0000
		20	0,0141	0,07	0,0001
26/2/11	43,3	10	0,0033	1,10	0,0003
		20	0,0141	1,20	0,0015
		30	0,0161	2,40	0,0033
27/2/11	22,5	10	0,0033	1,50	0,0004
		20	0,0141	1,82	0,0022
		30	0,0161	2,10	0,0029
11/3/11	27,1	10	0,0033	1,30	0,0004
		20	0,0141	1,60	0,0019
		30	0,0161	1,90	0,0026
9/4/11	27,0	10	0,0033	3,10	0,0009
		20	0,0141	3,90	0,0048
		30	0,0161	4,50	0,0063
12/4/11	32,8	10	0,0033	0,91	0,0003
		20	0,0141	1,23	0,0015
		30	0,0161	1,45	0,0020
13/4/11	25,0	10	0,0033	0,38	0,0001
		20	0,0141	0,51	0,0006
		30	0,0161	1,34	0,0019
18/4/11	22,5	10	0,0033	0,84	0,0002
		20	0,0141	1,12	0,0014
		30	0,0161	1,42	0,0020
		40	0,0184	2,35	0,0037
19/4/11	41,5	10	0,0033	0,36	0,0001
		20	0,0141	0,53	0,0006
		30	0,0161	0,95	0,0013
21/4/11	35,3	10	0,0033	0,14	0,0000
		20	0,0141	0,15	0,0002
30/4/11	19,9	10	0,0033	0,11	0,0000
		20	0,0141	0,14	0,0002
1/5/11	15,7	10	0,0033	0,15	0,0000
		20	0,0141	0,17	0,0002
2/5/11	18,7	10	0,0033	0,37	0,0001
		20	0,0141	0,59	0,0007
		30	0,0161	0,95	0,0013
		40	0,0184	1,89	0,0030
3/5/11	85,8	10	0,0033	0,75	0,0002
		20	0,0141	0,97	0,0012
		30	0,0161	1,68	0,0023
		40	0,0184	2,24	0,0036
4/5/11	78,6	10	0,0033	1,65	0,0005
		20	0,0141	2,51	0,0031
		30	0,0161	2,99	0,0042

Tabela 4. Continuação dos valores de precipitação total, lâmina escoada, concentração de sedimentos em suspensão, e produção de sedimentos estimada na microbacia da BERG.

		40	0,0184	3,62	0,0058
		50	0,0194	4,86	0,0081
5/5/11	108,0	10	0,0033	1,65	0,0005
		20	0,0141	2,51	0,0031
		30	0,0161	2,99	0,0042
		40	0,0184	3,62	0,0058
		50	0,0203	4,86	0,0085
20/5/11	82,0	10	0,0033	1,45	0,0048
		20	0,0141	1,68	0,0237
		30	0,0161	1,99	0,0320
		40	0,0184	2,32	0,0427
		50	0,0203	2,56	0,0520
		60	0,0231	3,45	0,0797
24/05/2011	34,0	10	0,0033	0,85	0,0028
		20	0,0141	1,2	0,0169
		30	0,0161	1,35	0,0217
		40	0,0184	1,56	0,0287
04/06/2011	11,5	10	0,0033	0,41	0,0014
		20	0,0141	0,52	0,0073
		30	0,0161	0,87	0,0140
05/06/2011	10,1	10	0,0033	0,45	0,0015
		20	0,0141	0,58	0,0082
		30	0,0161	0,94	0,0151
12/06/2011	10,8	10	0,0033	0,42	0,0014
		20	0,0141	0,55	0,0078
		30	0,0161	0,90	0,0145
13/06/2011	7,6	10	0,0033	0,25	0,0008
		20	0,0141	0,40	0,0056
		30	0,0161	0,77	0,0124
17/06/2011	59,0	10	0,0033	1,23	0,0041
		20	0,0141	1,58	0,0223
		30	0,0161	1,89	0,0304
		40	0,0184	2,45	0,0451
		50	0,0203	2,78	0,0564
18/06/2011	13,3	10	0,0033	0,41	0,0014
		20	0,0141	0,82	0,0116
		30	0,0161	1,37	0,0221
22/06/2011	13,6	10	0,0033	0,45	0,0015
		20	0,0141	0,87	0,0123
		30	0,0161	1,25	0,0201
03/07/2011	25,5	10	0,0033	0,39	0,0013
		20	0,0141	0,62	0,0087
		30	0,0161	0,84	0,0135
		50	0,0203	3,05	0,0619

Tabela 4. Continuação dos valores de precipitação total, lâmina escoada, concentração de sedimentos em suspensão, e produção de sedimentos estimada na microbacia da BERG.

06/07/2011	36,6	10	0,0033	1,23	0,0041
		20	0,0141	1,59	0,0224
		30	0,0161	1,87	0,0301
		40	0,0184	2,56	0,0471
		50	0,0203	2,99	0,0607
12/07/2011	12,0	10	0,0033	0,24	0,0008
		20	0,0141	0,34	0,0048
		30	0,0161	0,41	0,0066
13/07/2011	15,5	10	0,0033	0,29	0,0010
		20	0,0141	0,42	0,0059
		30	0,0161	0,56	0,0090
16/07/2011	15,3	10	0,0033	0,35	0,0012
		20	0,0141	0,41	0,0058
		30	0,0161	0,45	0,0072
17/07/2011	24,0	10	0,0033	0,38	0,0013
		20	0,0141	0,44	0,0062
		30	0,0161	0,51	0,0082
		40	0,0184	0,59	0,0109
31/07/2011	57,5	10	0,0033	1,14	0,0038
		20	0,0141	1,41	0,0199
		30	0,0161	1,75	0,0282
		40	0,0184	2,38	0,0438
		50	0,0203	2,61	0,0530
01/08/2011	18,0	10	0,0033	0,32	0,0011
		20	0,0141	0,44	0,0062
Média	34,1	-	0,0119	1,86	0,0091

De acordo com a Tabela 5, verificou-se que a produção de sedimentos média na microbacia da BERG foi de 0,091 t/dia ou 0,25 t/ha/ano. Nichols (2006) e Nearing et al. (2007) investigaram a produção de sedimentos em diversas microbacias de clima semiárido nos Estados Unidos, e obtiveram valores de produção de sedimentos entre 0,07 a 5,7 t/ha/ano. Achite e Ouillon (2007) obtiveram valores de produção de sedimentos em suspensão na grande bacia hidrográfica de Wadi Abd na Argélia de aproximadamente 13 t/ha/ano. Resultados distintos foram encontrados por Clapp et al. (2000), para o deserto de Yael em Israel, Oriente Médio, com produção de sedimentos de 40 t/ha/ano. Analisando os resultados obtidos na Bacia Experimental de Gameleira, e comparando com outros estudos, pode-se afirmar que a produção de sedimentos na microbacia da BERG apresentou valores que podem ser considerados como baixos, quando comparado com os valores observados nos estudos em outras regiões do mundo.

Entre junho de 2010 a agosto de 2011 foram registrados 50 eventos que produziram sedimentos que puderam ser quantificados na fossa de sedimentação, pois, mesmo o riacho da microbacia sendo perene, o transporte de sedimentos é episódico (Tabela 5). Verificaram-se variações dos totais de precipitação entre 7,6 a 142 mm dia⁻¹, vazão média com valores entre 0,003 a 0,0203 m³.s⁻¹, e produção de sedimentos variando entre 0,0001 a 0,2613 ton ha⁻¹.dia⁻¹. Como era esperado, os eventos que apresentam maiores valores de produção de sedimentos corresponderam às maiores precipitações.

O total de chuvas que geraram produção de sedimentos no período estudado foi da ordem de 500 mm, enquanto que a chuva total ocorrida no período chuvoso foi de aproximadamente 535 mm. Esses valores coincidem com a hipótese Wischmeier e Smith (1978), que chuvas erosivas são maiores ou iguais a 6,0 mm, desde que ocorram em, no máximo, 15 min e separadas entre si por um período de no mínimo 6 h. Observa-se que a vazão média obtida foi de aproximadamente 0,0119 m³.s⁻¹ e a produção de sedimentos em suspensão média foi de 0,0091 ton ha⁻¹.dia⁻¹.

A menor variabilidade encontrada entre os valores de descarga líquida com relação a produção de sedimentos, é explicada pelo fato de o solo apresentar um limite de infiltração de água, a partir do qual a taxa de enxurrada tende a se igualar aos distintos preparos do solo, pois gera uma rápida saturação do solo e com isso aumento da produção de sedimentos (Bertol et al., 2004). Na Tabela 2 pode-se observar a relação obtida entre as vazões e os valores médio da produção de sedimentos em suspensão.

A Figura 21 mostra os valores médios dos sedimentos em suspensão coletados pelo amostrador de sedimentos. A maior vazão de pico correspondeu a 0,014 m³/s e a maior concentração de sedimentos atingiu aproximadamente 4,8 mg/l. Esse foi o maior evento, registrado em 17/06/2010, durante a campanha. Os maiores eventos de cheia na região ocorreram entre 14 e 20/06/2010, com valores da precipitação variando entre 60 e 140 mm/dia.

O coeficiente de determinação R² entre a vazão e a descarga sólida para a seção hidrossedimentométrica, considerando todos os eventos foi de 0,77. Apesar de ter ainda poucos eventos observados, pode-se considerar que essa relação é satisfatória (Figura 21). O dispositivo de medição de sedimentos em suspensão foi capaz de registrar tanto os eventos de maior magnitude quanto os da baixa precipitação com transporte de sedimentos.

Observa-se que a produção de sedimentos de suspensão não ocorre de forma agrupada, e sim na forma dispersa com relação a linha de tendência (Figura 21). Percebe-se ainda na Figura 21, são poucos os dados para obter uma curva bem representativa, mas, o ajuste pode ser considerado satisfatório entre os dados de produção de sedimentos e a vazão.

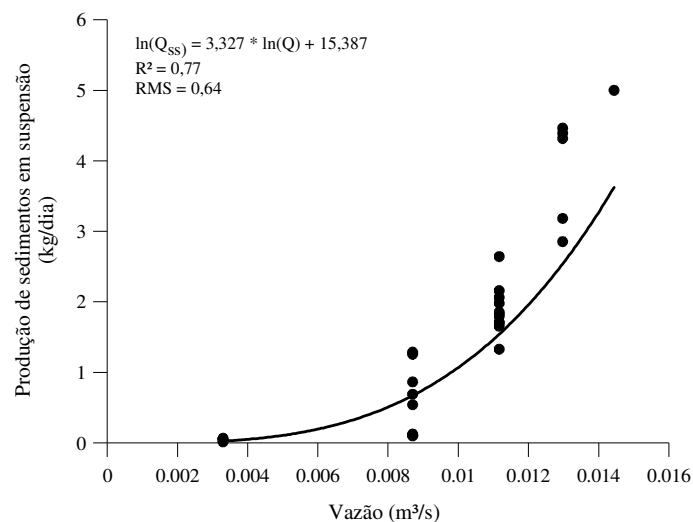


Figura 21. Relação entre as vazões e as descargas sólidas em suspensão média para cada evento registrado na microbacia.

Segundo Santos et al. (2010), a eficiência da cobertura vegetal em reduzir a produção de sedimentos pode ser atribuída, principalmente, à proteção dada pelas folhas das plantas, impedindo o impacto direto das gotas de chuva sobre a superfície, diminuindo dessa forma a desagregação do solo e resultando em baixa concentração de sedimentos no escoamento superficial. Além disso, na presença de plantas, grandes quantidades de água são transpiradas, reduzindo a umidade do solo, aumentando com isso a taxa de infiltração de água no solo e reduzindo o volume de escoamento superficial, a tendência ao encrostamento do solo, e aumento da rugosidade superficial, reduzindo a velocidade do escoamento superficial e, conseqüentemente, sua erodibilidade.

Observou-se que na região da microbacia experimental, somente eventos chuvosos acima de 6 mm provocaram escoamento superficial e com produção de sedimentos somente em eventos acima de 7 mm. Concluiu-se ainda que a produção de sedimentos média é da ordem de 0,578 ton.ha⁻¹.dia⁻¹, o que pode ser considerado moderado, devido ao fato da produção de sedimentos certamente ser reflexo das práticas agrícolas empregadas na bacia e também da ação de chuvas concentradas, que

provocam elevados picos de vazão. Nota-se também que em alguns eventos não se notou a relação direta da influência da precipitação total na quantidade de sedimentos, mostrando que a produção de sedimentos depende de outros fatores, como: as condições de umidade do solo antes do início dos eventos chuvosos e as variações nas intensidades da chuva. Isso mostra uma tendência da grande variabilidade da produção de sedimentos em eventos ocorridos nessa região. Para a microbacia experimental, a relação entre produção de sedimentos de arrasto e a precipitação foi considerada como baixa.

Dentre os fatores que influenciam na produção de sedimentos, pode-se citar: (a) a influência da umidade do solo antes dos eventos chuvosos devido a ocorrência de pequenos eventos de chuva antes dos eventos que geraram produção de sedimentos, (b) as características dos aspectos fluviais da microbacia estudada, como a diferença de altimetria entre a nascente do curso principal e da estação hidrossedimentométrica, (c) solos pouco profundos que beneficiam o escoamento superficial e a produção de sedimentos. Esses fatores acabam também contribuindo para um tempo de concentração pequeno e um fluxo turbulento decorrente do surgimento de pequenas ravinas e sulcos, com grandes quedas de nível.

A relação entre as descargas sólidas e a vazão para o presente estudo está mostrada na Figura 22. No desenvolvimento desta relação, a faixa da variação da vazão está limitada entre 0,003 m³/s e 0,016 m³/s. Deve-se ressaltar que foi registrado também, um grande número de eventos com pequenos valores de concentração de sedimentos e alguns eventos considerados como extremos (Figura 22).

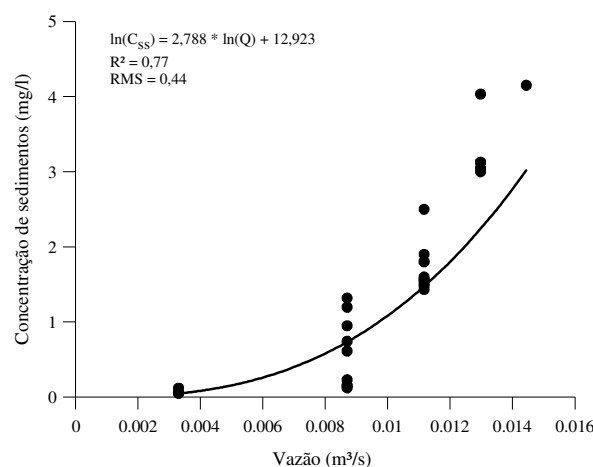


Figura 22. A concentração de sedimentos e a vazão observada em cada evento registrado na microbacia.

A influência dos eventos de cheia nas descargas líquidas e sólidas na microbacia da BERG é evidente apesar do riacho ser perene com apenas um filete de água durante a estiagem e, o transporte de sedimentos é episódico. Outro fator a ser considerado na produção de sedimentos na microbacia, é com relação à grande variabilidade da erosividade das chuvas na região. Segundo Silva (2004), a região Nordeste apresenta valores de erosividade das chuvas entre 20 e 5.000 MJ.mm.ha/h/ano. Em estudo mais recente, Silva et al. (2010), determinaram a erosividade das chuvas utilizando dados diários de precipitação de dez postos localizados nas proximidades da BERG, e obtiveram valores de erosividade da ordem de 3.600 a 4.400 MJ.mm.ha/h/ano. Isto indica que pode haver grandes variações interanuais na erosão do solo e produção de sedimentos.

Como era esperado, observou-se que os eventos que apresentaram os maiores valores de concentração de sedimentos correspondiam aos maiores valores de precipitação. Lopes e Srinivasan (1981) relataram que, para solos na região de Cariri Paraibana, em geral, apenas as chuvas com altas intensidades produzem escoamentos suficientes para causar erosão laminar, uma vez que as mesmas superem a capacidade de infiltração do solo. A situação na BERG é bem semelhante.

4.2. Modelagem hidrossedimentológica da microbacia

4.2.1. Discretização

Para modelar os processos de escoamento superficial e produção de sedimentos em microbacias, inicialmente realizou-se a discretização dessas microbacias em elementos de planos e canais. Para a aplicação dos processos de modelagem descritos no capítulo anterior, tais como: calibração de parâmetros do modelo, validação dos parâmetros e testes, ainda foi necessária preparação de diversos arquivos de dados e parâmetros não sujeitos à calibração. A microbacia foi dividida em 28 elementos, 19 planos e 9 canais (Figura 23).

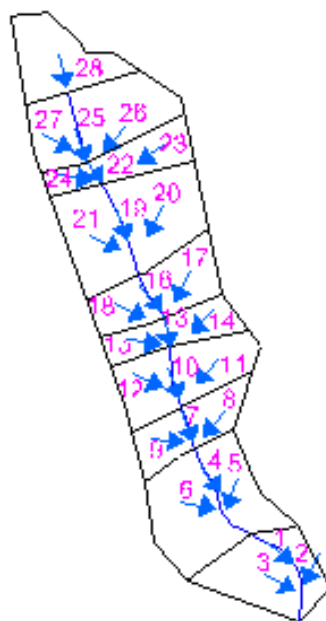


Figura 23. Discretização da microbacia.

4.2.2. Modelagem

Conforme descrito no capítulo anterior, o modelo KINEROS2 foi utilizado para modelar os processos hidrossedimentológicos da BERG, seguindo as etapas de: Calibração, validação e testes de sensibilidade.

Para aplicar o modelo KINEROS2, inicialmente foi realizado a preparação dos arquivos de entrada do modelo, definindo os parâmetros fixos conforme discutido no capítulo anterior. Depois foram otimizados os parâmetros de condutividade hidráulica saturada (K_s) e o potencial de capilaridade do solo (G), parâmetros que afetam diretamente o escoamento, que foram identificados através de vários testes dentro da faixa da variabilidade destes parâmetros até que os melhores valores dos mesmos que resultem nos valores da lâmina escoada mais próxima à observada para um maior número dos eventos registrados.

O processo de calibração dos eventos da Bacia Experimental de Riacho Gameleira foi realizado numa sequência descrito no capítulo anterior. Foi calibrado inicialmente o parâmetro de saturação relativa inicial do solo (S_i), o parâmetro de escoamento, que varia evento a evento de acordo com as condições do solo. O S_i apresentou uma facilidade relativa da calibração em quase todos os eventos. Isto já era esperado, pois, o modelo KINEROS2 já tinha sido exaustivamente testado para a região

semi-árida paraibana por Lopes, (2003) e tinha encontrado resultados bem satisfatórios. O parâmetro de lâmina, a saturação inicial do solo (S_i), teve que ser calibrada em todas as etapas evento a evento, inclusive para validação dos outros parâmetros, pois é um parâmetro que depende das condições da umidade do solo que se encontra antes do início de um evento.

O mesmo processo foi realizado para a erosão causada pelo impacto das gotas de chuva (cf), onde os valores deste parâmetro apresentaram uma grande variação, resultado este já discutido por Lopes, (2003). Como não existem valores indicativos na literatura sobre este parâmetro, e como o mesmo não possui nenhuma relação direta com as características do solo, mostrou-se bastante variável entre os eventos e mesmo assim, o parâmetro teve que ser calibrado.

4.2.2.1. Calibração

Os parâmetros fixos e não calibrados foram estabelecidos de acordo com as características da microbacia, ou seja, de acordo com o tipo de solo, cobertura vegetal, declividade, etc. Os valores adotados já foram indicados no capítulo anterior.

Observa-se que o valor médio da saturação do solo obtido, entre os eventos 2010 os quais foram utilizados para a calibração, foi 0,32 um valor um pouco mais baixo do que era esperado, em virtude deste valor está bem próximo ao ponto de murcha do solo que é na faixa de 0,25, para o tipo de solo predominante na microbacia estudada.

A tabela 5 mostra os resultados obtidos com a calibração do modelo utilizando os dados do inverno de 2010 da Bacia Experimental Riacho Gameleira. O valor médio do parâmetro splash (cf) obtido foi 4780977,14. A figura 24 apresenta uma comparação entre a produção de sedimentos observada e calculada pelo modelo KINEROS2. O valor de R^2 com 0,98 é excelente.

Tabela 5. Calibração com os dados do inverno de 2010 na Bacia Experimental Riacho Gameleira.

Cheia	Lâmina observada (mm)	Lâmina calculada (mm)	Saturação inicial (%)	Lc/Lo	Produção de sedimentos observada (Kg/ha)	Produção de sedimento calculada (Kg/ha)	cf	Ec/Eo
1	1,41	1,40	0,48	0,99	7,8	7,70	1050	0,99
2	1,54	1,53	0,51	0,99	10,1	9,90	1230	0,98
3	1,49	1,49	0,41	1,00	6,2	7,20	985	1,16
4	2,35	2,38	0,11	1,01	14,0	15,10	0,001	1,08
5	5,74	5,76	0,33	1,00	238,7	237,20	35	0,99
6	3,84	3,81	0,40	0,99	379,8	379,00	7920	1,00
7	3,21	3,23	0,22	1,01	55,8	56,30	22	1,01
8	1,53	1,53	0,35	1,00	27,9	28,00	542	1,00
9	3,97	3,95	0,10	0,99	116,3	120,00	100	1,03
10	5,94	5,89	0,50	0,99	147,3	162,00	96	1,10
11	6,82	6,86	0,75	1,01	1441,5	1500,50	633905	1,04
12	4,99	4,98	0,59	1,00	651,0	650,00	1611300	1,00
13	3,83	3,96	0,40	1,03	790,5	790,00	1192,4	1,00
14	3,35	3,31	0,29	0,99	713,0	674,20	100000	0,95
15	3,61	3,58	0,14	0,99	31,0	32,50	855	1,05
16	2,34	2,32	0,32	0,99	93,0	92,80	77000000	1,00
17	2,51	2,54	0,26	1,01	93,0	95,00	1112000	1,02
18	1,98	1,98	0,13	1,00	558,0	560,00	10800000	1,00
19	1,74	1,72	0,11	0,99	325,5	326,90	12400000	1,00
20	1,81	1,80	0,16	0,99	210,8	215,80	5620000	1,02
21	3,92	3,96	0,26	1,01	220,1	230,70	469000	1,05
22	2,74	2,75	0,32	1,00	275,9	290,00	95200	1,05
23	2,49	2,50	0,21	1,00	220,1	225,40	8400	1,02
24	3,11	3,09	0,26	0,99	558,0	568,65	696	1,02
25	2,05	2,05	0,45	1,00	465,0	480,60	9659900	1,03
Média			0,32				4780977,14	

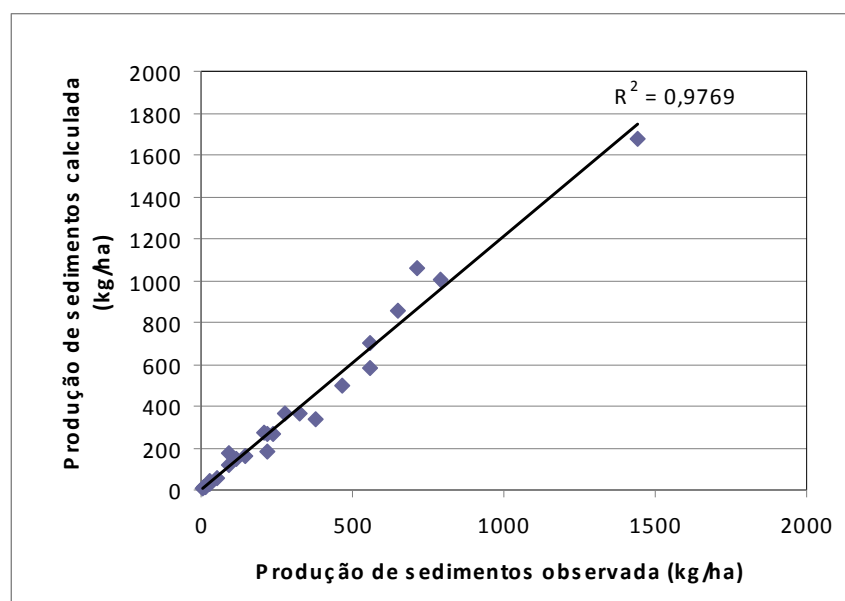


Figura 24. Comparação entre a produção de sedimentos observada e calculada.

4.2.2.2. Previsão da lâmina escoada sem calibração da saturação inicial

Nos 25 eventos calibrados para a saturação inicial do solo, apesar dos valores extremos ficarem em 75% e 11%, na maioria dos eventos este valor ficou bem próximo do valor médio de 32 %. Esta situação sugere a possibilidade de fixar este parâmetro no seu valor médio no processo da modelagem que permitiria a previsão da lâmina do escoamento sem a necessidade de calibragem em cada evento. Entretanto, o uso de valor médio da saturação poderá divergir do valor real da umidade que possa existir no início do evento e, portanto, uma avaliação dos possíveis discrepâncias nas lâminas de escoamentos previstas pelas simulações é necessária para se ter uma idéia de possíveis margens de erros nos cálculos da lâmina. Para este fim, uma análise da sensibilidade deste parâmetro foi realizada variando o mesmo em baixo e acima do valor médio de 32 %.

Tabela 6. Calibração com os dados do inverno de 2010 na Bacia Experimental Riacho Gameleira.

Cheia	Data	Chuva (mm)	Lâmina (mm)	Produção de sedimentos (kg/ha)
1	21/2/2011	11,25	1,72	15,50
2	19/4/2011	41,50	5,05	441,75
3	3/5/2011	85,80	7,90	810,96
4	5/5/2011	108,00	9,83	840,57
5	13/6/2011	7,60	0,85	9,15
6	17/6/2011	59,00	5,20	314,03
7	13/7/2011	15,50	1,44	11,01

Escolheu-se 7 eventos típicos, para representar eventos com baixa, média e grande produção de sedimentos para avaliar o impacto das possíveis variações das vazões geradas pelo valor médio da saturação sobre a produção de sedimentos pela erosão (Tabela 6). Os eventos 1 e 2 representam altos valores da erosão, eventos 3 e 4 valores médios, e os eventos 5, 6 e 7 eventos com baixos escoamentos e erosão. Devido ao fato que a erosão e produção de sedimentos são muito mais sensíveis para pequenas variações da vazão, os efeitos das variações da saturação inicial devem ser avaliados também pela variação na produção de sedimentos erodidos.

Para o estudo de sensibilidade foram consideradas as saturações de: 30%, 32%, 35%, 40%, 45%, 50% e 55%. Os eventos selecionados foram simulados para cada um destes valores da saturação inicial, mantendo-se os outros parâmetros nos seus valores calibrados. O escoamento superficial gerado e a produção de sedimentos pela erosão foram avaliados pelas diferenças entre os valores observados e simulados. As figuras de 25 a 31 mostram a evolução da lâmina escoada e da produção de sedimentos com a variação da saturação do solo no início dos eventos. Como era esperado, em todos os eventos foi observado que o aumento da saturação aumenta a lâmina escoada e conseqüentemente aumenta também a produção de sedimentos. De um modo geral, a lâmina escoada parece mais sensível para altos valores da saturação (a partir de 45%) e a produção de sedimentos mais sensível para baixos valores da saturação (até 40%). Isto significa que apenas para eventos da baixa produção de sedimentos o erro na estimativa de erosão seria significativo para pequenas diferenças da saturação inicial, porém, para eventos de grandes produções de sedimentos, os erros na estimativa da erosão seriam muito pequenos se a saturação inicial não for avaliada corretamente.

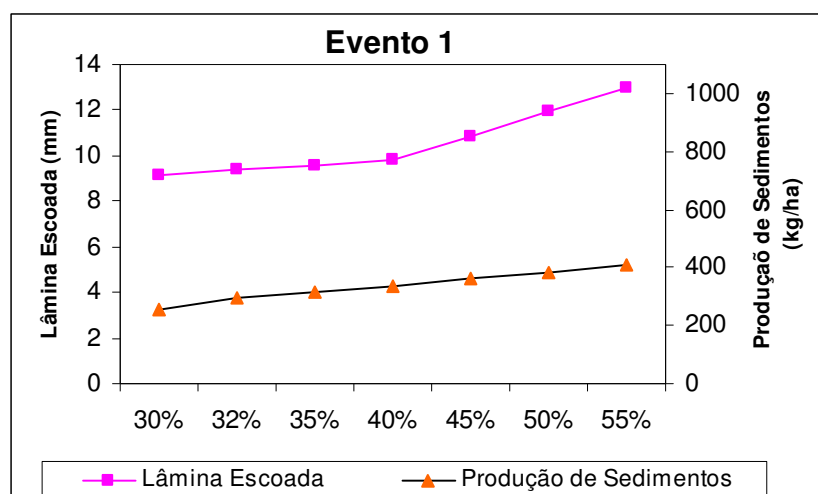


Figura 25. Estudo da variação da saturação do solo no evento 1.

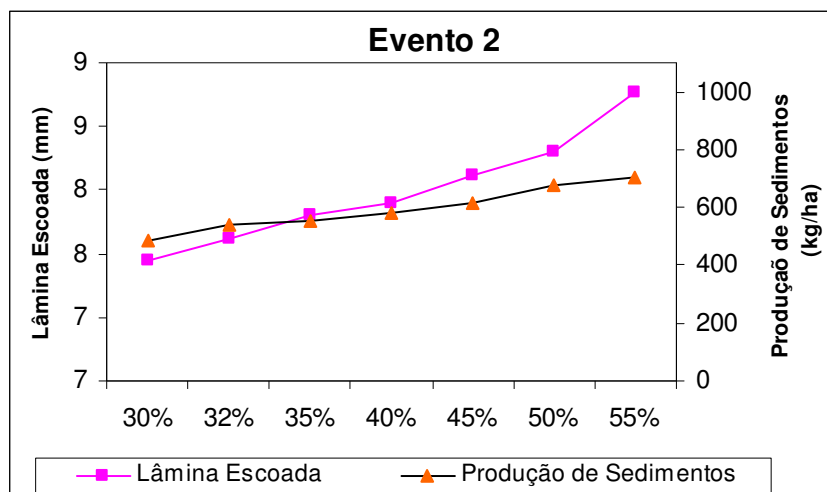


Figura 26. Estudo da variação da saturação do solo no evento 2.

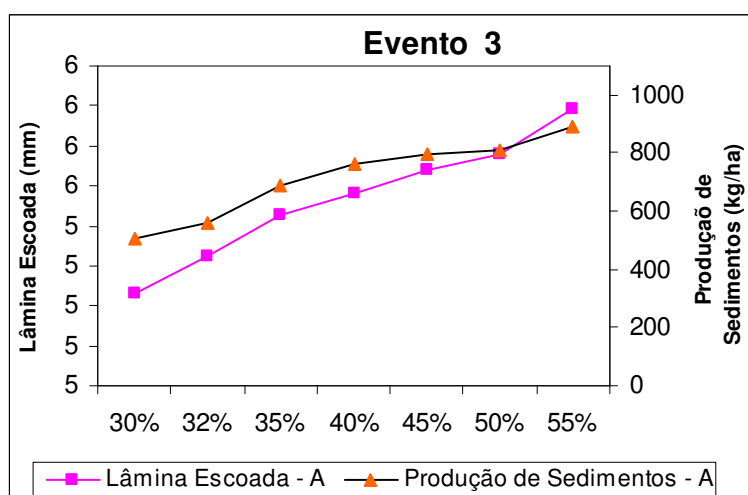


Figura 27. Estudo da variação da saturação do solo no evento 3.

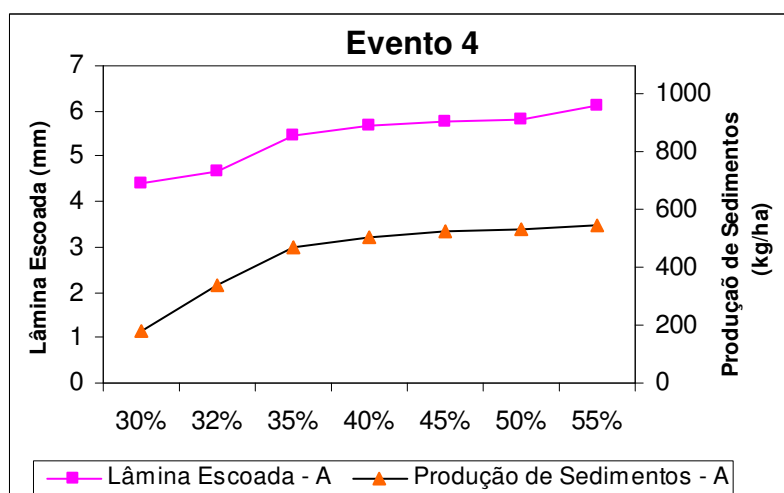


Figura 28. Estudo da variação da saturação do solo no evento 4.

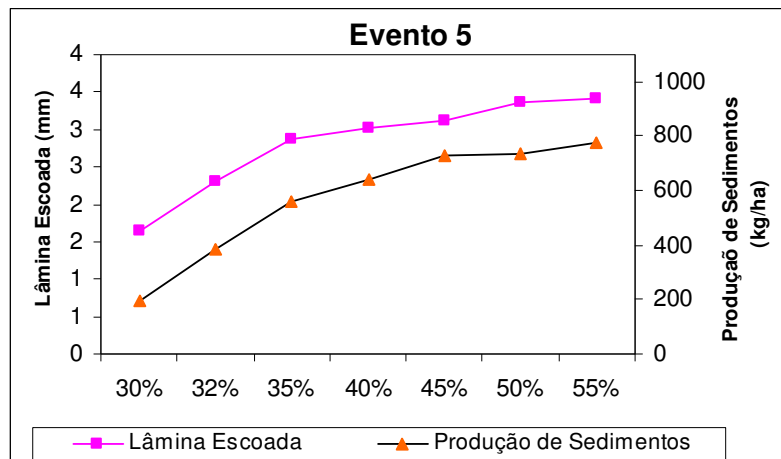


Figura 29. Estudo da variação da saturação do solo no evento 5.

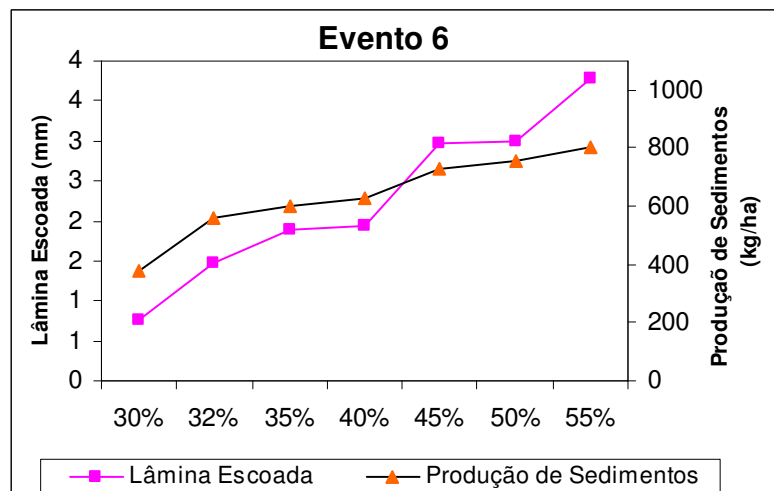


Figura 30. Estudo da variação da saturação do solo no evento 6.

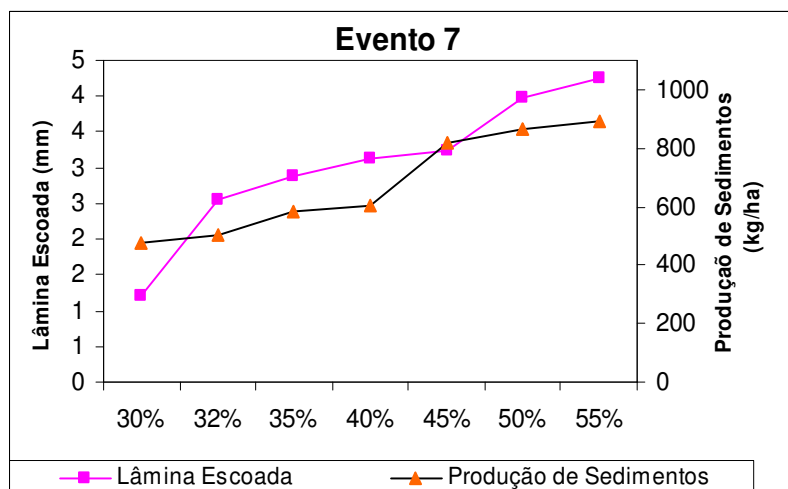


Figura 31. Estudo da variação da saturação do solo no evento 7.

4.2.2.3. Simulação com os parâmetros médios

Na seção anterior discutiu-se a possibilidade e os possíveis efeitos sobre a lâmina escoada e a produção de sedimentos. Seguindo a mesma linha de raciocínio, seria interessante verificar a possibilidade de utilizar o valor médio de todos os parâmetros como representativos da bacia. Em princípio, apenas a umidade do solo no início do evento pode variar entre eventos e outros parâmetros devem ter únicos valores representativos. De fato, a variação da umidade do solo também afeta as propriedades como a coesão do solo e conseqüentemente os parâmetros de solo também acabam tendo variações entre eventos na fase da calibração. Para verificar se um conjunto único de parâmetros forneceria resultados aceitáveis do escoamento e produção de sedimentos, todos os eventos utilizados na calibração da Tabela 6 foram simulados com parâmetros do valor médio das calibrações.

A tabela 7 apresenta resultados da simulação com os parâmetros médios calibrados com dados coletados em 2010. Nesta simulação observa-se uma pequena superestimação da lâmina escoada. Com a utilização da saturação média, era de esperar que haja ou uma pequena subestimação ou uma pequena super estimacão da lâmina, já que nenhum evento teria exatamente o valor médio da saturação. A relação entre a lâmina simulada e a lâmina observada, Lc/Lo apresentou um valor médio de 1,016, com um desvio padrão de 0,078. O coeficiente da determinação R^2 foi de 0,992 e o índice de Nash-Sutcliffe foi de 0,981. Estes números indicam um excelente resultado para a simulação da lâmina escoada com parâmetros médios. A relação Ec/Eo teve um valor médio = 1,212, desvio padrão = 0,092, $R^2 = 0,962$ e índice de Nash-Sutcliffe = 0,941, também indicando resultados bastante satisfatórios.

Tabela 7. Simulação com os parâmetros médios calibrados: $Si = 0,32$ - $cf = 4780977,136$ - co (plano) = 0,01 - co (canais) = 0,0001, utilizando os dados coletados em 2010.

Cheia	Lâmina observada - Lo (mm)	Lâmina calculada - Lc (mm)	Lc/Lo	Produção de sedimentos observada - Eo (Kg/ha)	Produção de sedimento calculada- Ec (Kg/ha)	Ec/Eo
1	1,41	1,55	1,10	7,8	11,30	1,45
2	1,54	1,65	1,07	10,1	12,90	1,28
3	1,49	1,56	1,05	6,2	5,22	0,84
4	2,35	2,22	0,94	14	16,35	1,17
5	5,74	5,70	0,99	238,7	275,00	1,15
6	3,84	3,98	1,04	379,8	314,10	0,83
7	3,21	3,14	0,98	55,8	51,20	0,92
8	1,53	1,56	1,02	27,9	40,50	1,45
9	3,97	3,79	0,95	116,3	132,70	1,14
10	5,94	6,50	1,09	147,3	175,20	1,19
11	6,82	7,20	1,06	1441,5	1750,34	1,21
12	4,99	5,18	1,04	651	875,20	1,34
13	3,83	3,91	1,02	790,5	1035,00	1,31
14	3,35	3,29	0,98	713	1060,30	1,49
15	3,61	3,54	0,98	31	24,74	0,80
16	2,34	2,38	1,02	93	123,20	1,32
17	2,51	2,48	0,99	93	163,89	1,76
18	1,98	2,11	1,07	558	571,10	1,02
19	1,74	1,71	0,98	325,5	375,40	1,15
20	1,81	1,79	0,99	210,8	255,50	1,21
21	3,92	3,86	0,98	220,1	272,50	1,24
22	2,74	2,75	1,00	275,9	335,50	1,22
23	2,49	2,58	1,04	220,1	198,30	0,90
24	3,11	3,20	1,03	558	987,60	1,77
25	2,05	2,01	0,98	465	525,20	1,13
Valores médios	-	-	1,016	-	-	1,212
Desvio Padrão	-	-	0,078	-	-	0,092
R²	-	-	0,992	-	-	0,962
I. E. Nash-Suctcliffe	-	-	0,981	-	-	0,941

4.2.2.4. Validação

Realizadas as calibrações dos parâmetros do modelo KINEROS2 com todos os dados coletados em 2010, a validação dos mesmos foi feita com os dados colhidos em 2011 na microbacia da Bacia Experimental Riacho Gameleira. A Tabela 8 apresenta os resultados da simulação dos eventos de 2011 com os parâmetros médios calibrados do solo. A saturação inicial do solo foi calibrada evento a evento também nesta fase da validação para que a simulação da erosão seja o mais fiel possível.

Devido à diversas fontes de erro inerentes nas medições de concentração de sedimentos e a quantificação volumétrica dos sedimentos erodidos na fossa de sedimentos, a divergência entre a erosão simulada pelo modelo e o valor observado sempre tende ser maior do que a divergência entre o escoamento simulado e observado. Sendo assim, a calibração da saturação inicial do solo para gerar a lâmina de escoamento superficial mais próximo ao observado é desejável para a simulação satisfatória da produção de sedimentos nos eventos individuais.

Os resultados das simulações com os dados de 2011 estão apresentados na Tabela 8. Devido à calibração da saturação inicial do solo em cada evento, a relação entre a lâmina simulada e a lâmina observada é praticamente igual a 1 em todos os eventos. Portanto os resultados mais interessantes para a validação serão da produção de sedimentos e principalmente, a relação Ec/Eo entre a erosão simulada e erosão observada. Nos 35 eventos simulados para a validação, em 15 eventos a relação Ec/Eo é maior do que 1 e em 20 eventos menor do que 1, com o valor médio de 1,082. O desvio médio de apenas 8,2 % na previsão eventual da erosão pode ser considerado excelente, já que as estimativas da produção de sedimentos geralmente têm erros considerados maiores do que este valor. O desvio padrão desta relação, Ec/Eo , ficou em 0,11, o coeficiente de determinação, R^2 , foi de 0,87 e o fator da eficiência de Nash-Sutcliffe foi de 0,865. Estes números indicam que os parâmetros calibrados do modelo KINEROS2 para BERG estão muito bem validados e o modelo calibrado pode servir como uma boa ferramenta para as previsões do escoamento superficial e da produção de sedimentos pela erosão em eventos individuais da precipitação. A Figura 32 faz a comparação entre a produção de sedimentos observada e calculada nesta fase da validação.

Tabela 8. Validação com os parâmetros médios calibrados: $cf = 4780977,136$ - co (plano) = 0,01 - co (canais) = 0,0001.

Cheia	<i>Lo</i> (mm)	<i>Lc</i> (mm)	<i>Lc/Lo</i>	<i>Si</i>	<i>Eo</i> (Kg/ha)	<i>Ec</i> (Kg/ha)	<i>Ec/Eo</i>
1	2,21	2,2	1	0,58	55,8	79,5	0,7
2	2,3	2,31	1	0,41	24,8	28,3	0,88
3	1,72	1,7	1,01	0,36	15,5	18,3	0,85
4	5,24	5,25	1	0,11	348,75	394,65	0,88
5	2,87	2,9	0,99	0,35	282,1	305,35	0,92
6	2,98	3	0,99	0,43	42,01	39,5	1,06
7	2,91	2,9	1	0,14	170,5	140,26	1,22
8	3,2	3,2	1	0,33	217	200,5	1,08
9	2,7	2,71	1	0,17	178,25	205,69	0,87
10	2,44	2,45	1	0,56	133,3	150,65	0,88
11	5,05	5	1,01	0,68	441,75	410,5	1,08
12	4,67	4,7	0,99	0,67	64,33	78,91	0,82
13	2,85	2,85	1	0,37	19,22	21,56	0,89
14	1,97	1,99	0,99	0,25	12,56	14,75	0,85
15	2,32	2,32	1	0,12	14,42	10,84	1,33
16	7,9	7,9	1	0,36	810,96	968,55	0,84
17	6,85	6,85	1	0,3	445,63	496,77	0,9
18	9,83	9,85	1	0,18	840,57	510,5	1,65
19	7,58	7,6	1	0,18	502,51	794,2	0,63
20	4,52	4,5	1	0,19	143,38	205,4	0,7
21	1,54	1,55	0,99	0,29	53,05	32,9	1,61
22	1,46	1,45	1,01	0,32	31,62	11,86	2,67
23	1,41	1,4	1,01	0,18	19,1	10,57	1,81
24	0,85	0,85	1	0,29	9,15	10,2	0,9
25	5,2	5,2	1	0,43	314,03	300,8	1,04

Tabela 8. Continuação da validação com os parâmetros médios calibrados: $cf = 4780977,136$ - co (plano) = 0,01 - co (canais) = 0,0001.

26	1,54	1,55	0,99	0,17	24,18	20,1	1,2
27	1,62	1,6	1,01	0,22	15,19	19,8	0,77
28	2,97	2,98	1	0,45	113	151,8	0,74
29	3,9	3,9	1	0,38	130,98	105,88	1,24
30	1,28	1,28	1	0,41	9,61	8,68	1,11
31	1,44	1,45	0,99	0,12	11,01	8,99	1,22
32	1,3	1,3	1	0,32	11,63	13,55	0,86
33	2,74	2,75	1	0,28	56,58	48,2	1,17
34	5,12	4,96	1,03	0,4	220,3	278,3	0,79
35	1,86	1,8	1,03	56,27	50,25	45,6	1,1
Valores médios	-	-	-	-	-	-	1,082
Desvio Padrão	-	-	-	-	-	-	0,11
R²	-	-	-	-	-	-	0,87
I. E. Nash-Suctcliffe	-	-	-	-	-	-	0,865

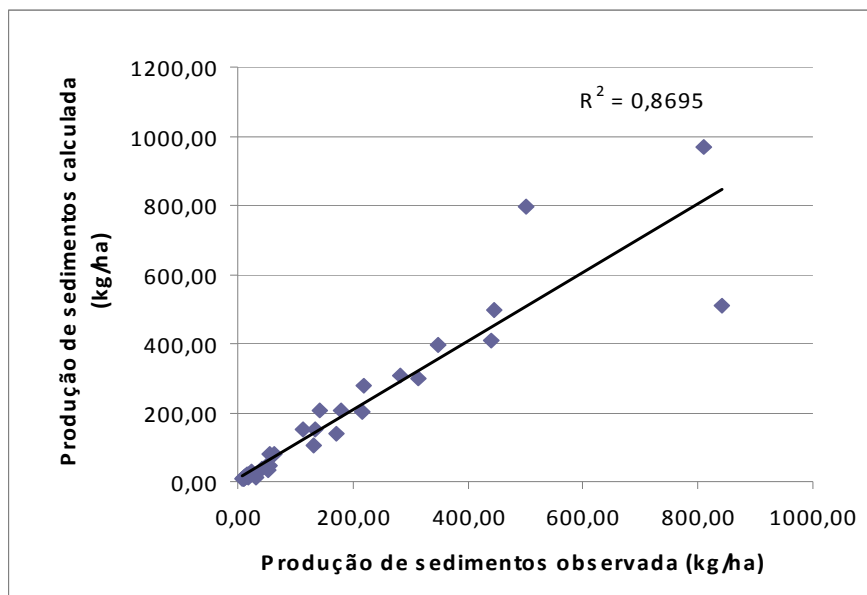


Figura 32. Comparação entre a produção de sedimentos observada e calculada.

4.2.2.5. Simulação com os parâmetros médios regionais

A existência dos parâmetros regionais para um modelo hidrossedimentológico é uma hipótese, que implica na possibilidade de simular satisfatoriamente, diversas bacias dentro de uma região hidrologicamente homogênea, com um único conjunto dos parâmetros. Esta idéia também implica na portabilidade de parâmetros calibrados numa bacia para outra com características semelhantes dentro da mesma região. Srinivasan e Paiva (2009) mostraram que um único conjunto de parâmetros hidrossedimentológicos pode simular bem as Bacias Experimentais de Sumé e de São João de Cariri na Paraíba, sendo estes obtidos pelos valores médios calibrados nas diversas unidades das duas Bacias Experimentais. Com o intuito de verificar a portabilidade destes parâmetros da erosão, c_f e c_o foram realizadas simulações dos eventos da Bacia Experimental do Riacho Gameleira (BERG). Vale salientar que a saturação inicial calibrada em cada evento foi mantida para simular o escoamento corretamente.

Na Tabela 9 estão apresentados os resultados obtidos com as simulações realizadas na microbacia da BERG com o conjunto único dos parâmetros do solo. A Figura 33 mostra a comparação gráfica entre E_o e E_c na microbacia da BERG utilizando os parâmetros regionais.

Analisando os resultados da Tabela 9, e as comparações gráficas da produção de sedimentos nas microbacias das duas bacias experimentais, observa-se que o valor de R^2 entre o valor simulado (E_c) e o valor observado (E_o) em todos os casos ficou variando de 0,8 a 1,10. O fator de eficiência

de Nash-Sutcliffe, também apresentou a mesma tendência, indicando bons resultados nas simulações em todos os casos com o conjunto único de parâmetros. Como a modelagem do processo de erosão do solo está sujeita a muito mais incertezas do que a do processo da geração do escoamento superficial, os resultados podem ser considerados como bastante satisfatórios. A estimativa dos parâmetros físicos no campo, apesar de ser uma opção, envolveria grandes investimentos para obter um número das medições suficientes como amostras e ainda exigiria a aplicação de técnicas geoestatísticas para determinar o valor representativo.

Pomeroy et al. (2005), mostraram que apesar de ter realizado um monitoramento de longo prazo bem instrumentado, em várias bacias hidrográficas no Canadá, nenhuma melhora na compreensão da relação chuva-vazão foi percebida. Eles atribuem isso, em parte, à utilização de modelos conceituais, em vez de modelos hidrológicos de base física. O mérito dos modelos de base física é que os parâmetros podem ser transferidos para outros locais com mais facilidade do que outros tipos de modelos.

Tabela 9. Simulação com os parâmetros médios regionais calibrados: $Si = 0,32$, $cf = 8 \times 10^5$, - co (plano) = 0,01 - co (canais) = 0,00001, $Ks = 3,75$ mm/h, $G = 295$, $Ro = 0,1$, $Sp = 0,3$ m, $In = 0,76$, $C = 1,0$, $n = 0,072$.

Cheia	Data	Chuva (mm)	Lâmina observada - <i>Lo</i> (mm)	Lâmina calculada - <i>Lc</i> (mm)	<i>Lc/Lo</i>	<i>Si</i>	Produção de sedimentos observada - <i>Eo</i> (Kg/ha)	Produção de sedimento calculada - <i>Ec</i> (Kg/ha)	<i>Ec/Eo</i>
1	11/01/2011	15,75	2,21	2,20	1,00	0,60	55,80	19,60	2,85
2	26/01/2011	16,00	2,30	2,31	1,00	0,44	24,80	15,80	1,57
3	21/02/2011	11,25	1,72	1,70	1,01	0,41	15,50	10,10	1,53
4	26/02/2011	43,25	5,24	5,25	1,00	0,14	348,75	281,50	1,24
5	27/02/2011	22,50	2,87	2,90	0,99	0,37	282,10	215,60	1,31
6	11/03/2011	27,10	2,98	3,00	0,99	0,47	42,01	28,74	1,46
7	09/04/2011	27,00	2,91	2,90	1,00	0,18	170,50	125,30	1,36
8	12/04/2011	32,75	3,20	3,20	1,00	0,39	217,00	161,32	1,35
9	13/04/2011	25,00	2,70	2,71	1,00	0,21	178,25	105,63	1,69
10	18/04/2011	22,50	2,44	2,45	1,00	0,58	133,30	99,80	1,34
11	19/04/2011	41,50	5,05	5,00	1,01	0,71	441,75	642,68	0,69
12	21/04/2011	35,30	4,67	4,70	0,99	0,68	64,33	48,05	1,34
13	30/04/2011	19,90	2,85	2,85	1,00	0,42	19,22	13,98	1,37
14	01/05/2011	15,70	1,97	1,99	0,99	0,34	12,56	8,71	1,44
15	02/05/2011	18,70	2,32	2,32	1,00	0,21	14,42	9,89	1,46
16	03/05/2011	85,80	7,90	7,90	1,00	0,41	810,96	638,90	1,27
17	04/05/2011	78,60	6,85	6,85	1,00	0,35	445,63	314,60	1,42
18	05/05/2011	108,00	9,83	9,85	1,00	0,21	840,57	715,30	1,18
19	20/05/2011	82,00	7,58	7,60	1,00	0,23	502,51	356,60	1,41
20	24/05/2011	34,00	4,52	4,50	1,00	0,24	143,38	100,80	1,42
21	04/06/2011	11,50	1,54	1,55	0,99	0,31	53,05	39,70	1,34
22	05/06/2011	10,10	1,46	1,45	1,01	0,35	31,62	25,60	1,24

Tabela 9. Continuação da Simulação com os parâmetros médios regionais calibrados: $Si = 0,32$, $cf = 8 \times 10^5$, - co (plano) = 0,01 - co (canais) = 0,00001, $Ks = 3,75$ mm/h, $G = 295$, $Ro = 0,1$, $Sp = 0,3$ m, $In = 0,76$, $C = 1,0$, $n = 0,072$.

Cheia	Data	Chuva (mm)	Lâmina observada - <i>Lo</i> (mm)	Lâmina calculada - <i>Lc</i> (mm)	<i>Lc/Lo</i>	<i>Si</i>	Produção de sedimentos observada - <i>Eo</i> (Kg/ha)	Produção de sedimento calculada - <i>Ec</i> (Kg/ha)	<i>Ec/Eo</i>
23	12/06/2011	10,80	1,41	1,40	1,01	0,23	19,10	14,31	1,33
24	13/06/2011	7,60	0,85	0,85	1,00	0,32	9,15	7,15	1,28
25	17/06/2011	59,00	5,20	5,20	1,00	0,45	314,03	244,20	1,29
26	18/06/2011	13,30	1,54	1,55	0,99	0,19	24,18	20,54	1,18
27	22/06/2011	13,60	1,62	1,60	1,01	0,23	15,19	10,20	1,49
28	03/07/2011	25,50	2,97	2,98	1,00	0,39	113,00	97,86	1,15
29	06/07/2011	36,00	3,90	3,90	1,00	0,35	130,98	102,13	1,28
30	12/07/2011	12,00	1,28	1,28	1,00	0,47	9,61	7,25	1,33
31	13/07/2011	15,50	1,44	1,45	0,99	0,18	11,01	8,84	1,24
32	16/07/2011	15,30	1,30	1,30	1,00	0,29	11,63	7,88	1,48
33	17/07/2011	24,00	2,74	2,75	1,00	0,31	56,58	30,57	1,85
34	31/07/2011	57,5	5,12	5,10	1,00	0,66	244,13	174,21	1,40
35	01/08/2012	18,0	1,86	1,85	1,01	0,67	56,27	28,60	1,97
Valores médios	-	-	-	-	-	-	-	-	1,981
Desvio Padrão	-	-	-	-	-	-	-	-	0,091
R²	-	-	-	-	-	-	-	-	0,853
I. E. Nash-Suctcliffe	-	-	-	-	-	-	-	-	0,831

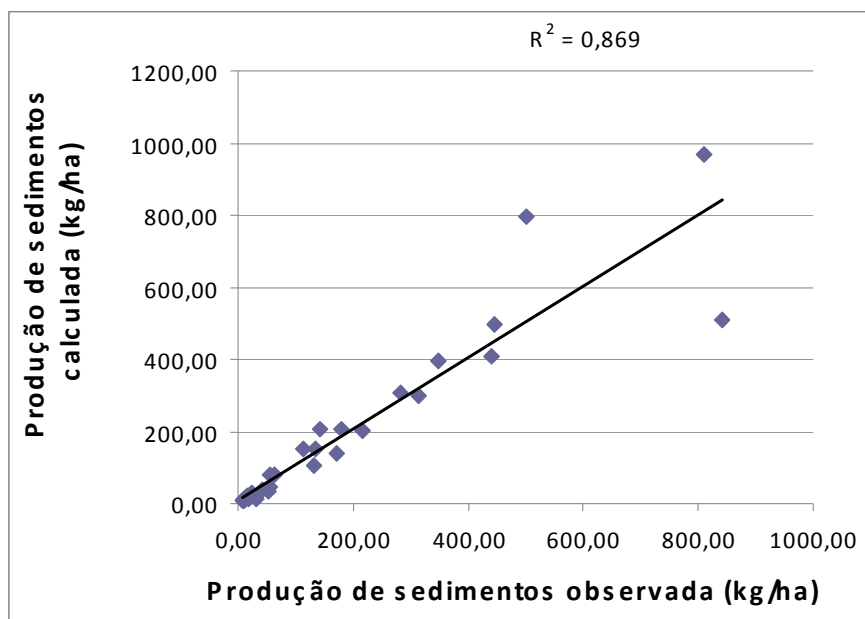


Figura 33. Comparação entre a produção de sedimentos observada e calculada.

4.3. Perdas de nutrientes no solo

A determinação da perda de nutrientes consistiu na análise química das amostras retiradas da caixa de sedimentação quanto aos teores de carbono (C), fósforo (P) e potássio (K), após cada um dos 50 eventos registrados de produção de sedimentos.

A Tabela 10 apresenta os teores ou concentrações totais de carbono, fósforo e potássio na amostra de sedimento de cada evento. Analisando os teores de C, pode-se observar que esse foi o elemento com maior concentração média de, $4,995 \text{ g.kg}^{-1}$, comparado com o fósforo, $0,249 \text{ g.kg}^{-1}$, e o potássio $3,076 \text{ g.kg}^{-1}$, tal qual resultados obtidos nos estudos de Schick et al. (2000) e Bertol et al. (2004).

Tabela 10. Concentrações de carbono, fósforo e potássio totais nas amostras de sedimentos da microbacia da Bacia Experimental do Riacho Gameleira.

Amostras	Data	Carbono (g kg^{-1})	Fósforo (g kg^{-1})	Potássio (g kg^{-1})
1	04/06/2010	13,3	0,12	5,3
2	16/06/2010	2,4	0,17	1,8
3	17/06/2010	13,3	0,62	1,5
4	20/06/2010	3,2	0,66	2
5	23/06/2010	3,9	0,57	1,8
6	27/06/2010	2,2	0,48	2,4
7	09/07/2010	4,6	0,67	2,6
8	13/07/2010	6,9	0,42	3,1
9	18/07/2010	7,5	0,39	1,8

10	21/07/2010	9,3	0,46	2,2
11	28/07/2010	5,4	0,3	2,6
12	30/06/2010	7,4	0,48	2
13	07/08/2010	5,3	0,48	2,4
14	10/08/2010	8,4	0,52	2,9
15	22/08/2010	17,7	0,28	5,1
16	11/01/2011	7,58	0,01	4,4
17	26/01/2011	6,92	0,01	3,7
18	21/02/2011	11,48	0,22	4,2
19	26/02/2011	6,56	0,22	3,1
20	27/02/2011	8,72	0,13	5,1
21	11/03/2011	3,08	0,08	2,6
22	09/04/2011	2,9	0,11	3,1
23	12/04/2011	5	0,29	4
24	13/04/2011	2,24	0,13	3,3
25	18/04/2011	4,52	0,22	3,7
26	19/04/2011	2,42	0,11	2,2
27	21/04/2011	0,32	0,13	2,2
28	30/04/2011	0,38	0,09	1,1
29	01/05/2011	2	0,07	3,5
30	02/05/2011	1,1	0,21	2
31	03/05/2011	1,82	0,26	1,8
32	04/05/2011	4,04	0,88	1,8
33	05/05/2011	2,66	0,09	4,2
34	20/05/2011	4,46	0,23	3,7
35	24/05/2011	2	0,1	2,6
36	04/06/2011	3,32	0,67	3,1
37	05/06/2011	7,7	0,13	4,4
38	12/06/2011	5,12	0,1	3,5
39	13/06/2011	2,9	0,29	4
40	17/06/2011	0,98	0,08	3,5
41	18/06/2011	2,3	0,08	3,7
42	22/06/2011	1,52	0,07	3,7
43	03/07/2011	6,92	0,08	3,5
44	06/07/2011	0,92	0,09	4,2
45	12/07/2011	2,48	0,08	4,4
46	13/07/2011	1,4	0,09	3,3
47	16/07/2011	2,78	0,08	1,3
48	17/07/2011	4,88	0,09	3,3
49	31/07/2011	3,92	0,14	2,4
50	01/08/2012	11,6	0,21	3,7
Média		4,995	0,249	3,076
Desvio Padrão		4,9948	0,2498	3,076

As Figuras 34 e 35 representam graficamente a variação nas concentrações de carbono, fósforo e potássio nas amostras dos sedimentos obtidos ao longo do período de amostragem de 2010 e 2011.

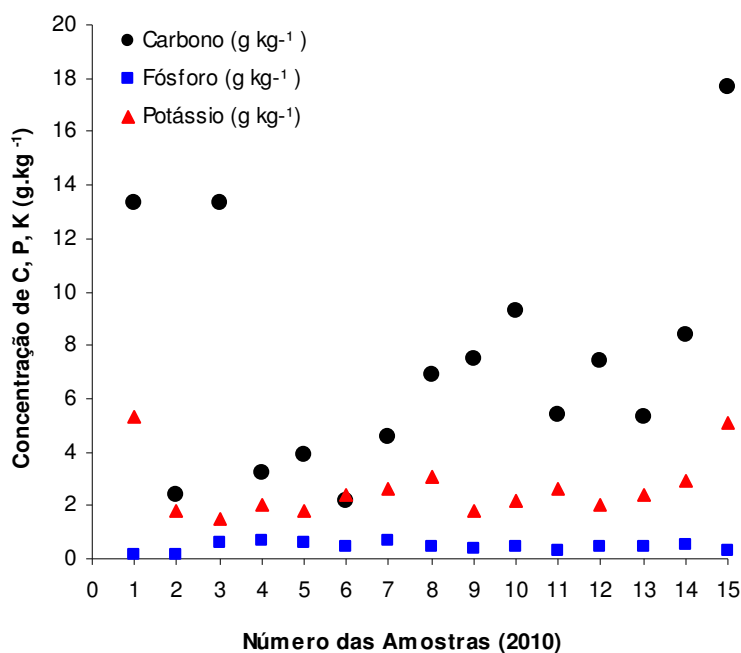


Figura 34. Concentração de nutrientes (C, P e K) nos sedimentos amostrados na caixa de sedimentação da microbacia experimental do Riacho Gameleira 2010.

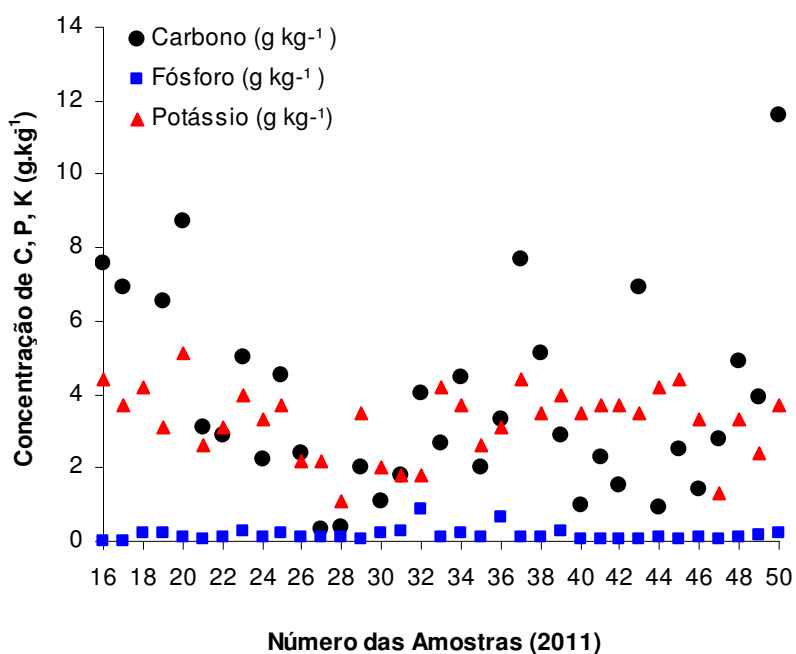


Figura 35. Concentração de nutrientes (C, P e K) nos sedimentos amostrados na caixa de sedimentação da microbacia experimental do Riacho Gameleira 2010.

A variabilidade nos teores ao longo do tempo apresentou a mesma sequência, sendo maior para o carbono, menor para o fósforo e intermediário para o potássio.

Em relação ao C, as concentrações determinadas podem ser consideradas como muito baixas comparadas com os encontrados por Galvão et al (2005) em uma microbacia antropizada da PB, com teor médio de 11 g.kg^{-1} na camada de 0-20 cm, em um total de 180 amostras. Na mesma microbacia, em área preservada sob mata o teor de C na mesma camada atingiu $27,4 \text{ g.kg}^{-1}$ ($n=42$) (Santos e Salcedo, 2010). Da mesma forma, os teores de P total de $0,8 \text{ g.kg}^{-1}$ correspondem, na região NE, aos Neossolos regolíticos, que são os solos com menores teores de P total (Salcedo e Sampaio, 2008). Os teores de K total são fortemente variáveis em função do material originário do solo. Steiner (2010), trabalhando com 15 solos, encontraram teores de K total oscilando entre 0,5 e $5,6 \text{ g.kg}^{-1}$ de K total. De uma forma geral, os solos da região NE são bem providos de K e os teores obtidos nos sedimentos do presente trabalho parecem confirmar essa tendência.

De forma geral, as pesquisas envolvendo modelos hidrossedimentológicos dão ênfase ao impacto da erosão dos solos no assoreamento de açudes e cursos de água. Com os dados aqui apresentados se deseja ressaltar a transferência de nutrientes envolvido na redistribuição de sedimentos. A perda de carbono está diretamente relacionada com o empobrecimento da atividade biológica do solo, fundamental para manter um bom nível de fertilidade e produtividade, em quanto o fósforo e o potássio são dois nutrientes essenciais para as plantas. A transferência desses nutrientes do solo para o sistema aquático, representa uma perda da capacidade produtiva dos solos erodidos, que pode ser traduzida em termos de impacto financeiro.

Para esse fim tomou-se por base o preço de mercado do kg de fósforo, de R\$16,3 (derivado do preço de um saco de 25 kg de fosfato supersimples com 18% P_2O_5 , R\$31,50) e do kg de potássio, de R\$3,17 (a partir do preço de uma saco de 50 kg de cloreto de potássio contendo 60% K_2O , R\$79,00).

As perdas totais de carbono, fósforo e potássio, foram obtidas como o produto das concentrações média das amostras (4,995 kg C/t sedimento; 0,249 kg P/t sedimento e 3,076 kg K/t sedimento, Tabela 10) pela massa total de sedimento recolhido na fossa de sedimentação ($7,33 \text{ t/ha} \times 58,7 \text{ ha} = 430 \text{ t solo}$), o que resulta em 2147 kg de C, 107 kg de P e 1322 kg de K. Multiplicando-se os preços unitários pelas massas de fósforo e potássio recuperados na caixa de sedimentação, chega-se a valores de R\$1.744,00 e de R\$4.190,00 para repor o fósforo e o potássio perdidos dos solos da microbacia.

A perda de sedimento registrada no presente estudo é elevada, se comparada aos dados disponíveis para a região NE, com valores de precipitação pluviométrica até maiores, que foram sumarizados por Salcedo e Sampaio (2008). Admitindo-se que o sedimento recolhido foi perdido de forma homogênea na área de 58,7 ha da microbacia ($7,3 \text{ t.ha}^{-1}$), e considerando-se uma densidade de solo de $1,3 \text{ t.m}^{-3}$, a massa de sedimento erodido corresponde a uma espessura de solo de 0,56 mm. Como parte da área apresenta cobertura arbórea e também há áreas de topo e de várzea, é

possível que parte da bacia tenha perdido pouco ou nenhum sedimento e outras áreas tenham perdido mais de 1 mm de solo no ano. Segundo Pimentel (2006) a taxa de formação de solo varia entre 0,5 e 1 t.ha⁻¹ ano⁻¹, enquanto a perda correspondeu de 7 a 15 vezes essa quantia, segundo a taxa de formação de solo que se considere. O processo erosivo laminar é pouco perceptível, mas as quantidades de carbono (e o nitrogênio associado, relação C/N=11), fósforo e potássio perdidas são significativas e vão deixando essas áreas progressivamente menos capazes de produzir alimentos, além de produzir eutrofização e assoreamento do sistema de drenagem da bacia.

4.4. Aplicação do método de isótopo traçador ⁷Be

Como um primeiro teste na região do Nordeste do Brasil foi realizado a aplicação da técnica do isótopo traçador ⁷Be, como traçador de erosão, como apresentado em detalhes na metodologia. Os dados foram coletados de acordo com a metodologia descrita no capítulo anterior. A técnica que utiliza o isótopo traçador (⁷Be) para avaliar os padrões de erosão, transporte e deposição de sedimentos consiste na comparação do inventário do isótopo em locais pré-selecionados da bacia com o inventário medido em áreas de referência, nas quais se admite não haver erosão ou deposição ou que a movimentação de solo seja insignificante.

4.4.1. Dados de ⁷Be em uma encosta da Bacia Experimental Riacho Gameleira

Os aportes de ⁷Be na superfície da terra ocorrem via água de chuva, a qual infiltra no solo. Assim, é necessário retirar amostras de solo para quantificar o ⁷Be nas camadas superficiais de solo, como descrito na metodologia.

A figura 36 mostra o evento chuvoso ocorrido um dia antes da coleta das amostras de solo em 14/06/2010. Foi um evento chuvoso intenso que gerou uma boa infiltração de água no solo na área plana e provavelmente erosão nas encostas. Semelhantemente, a figura 37 mostra o evento chuvoso ocorrido um dia antes da coleta das amostras de solo em 07/05/2011, que foi de media intensidade, pois o inverno de 2011 foi mais brando que o de 2010 na área experimental.

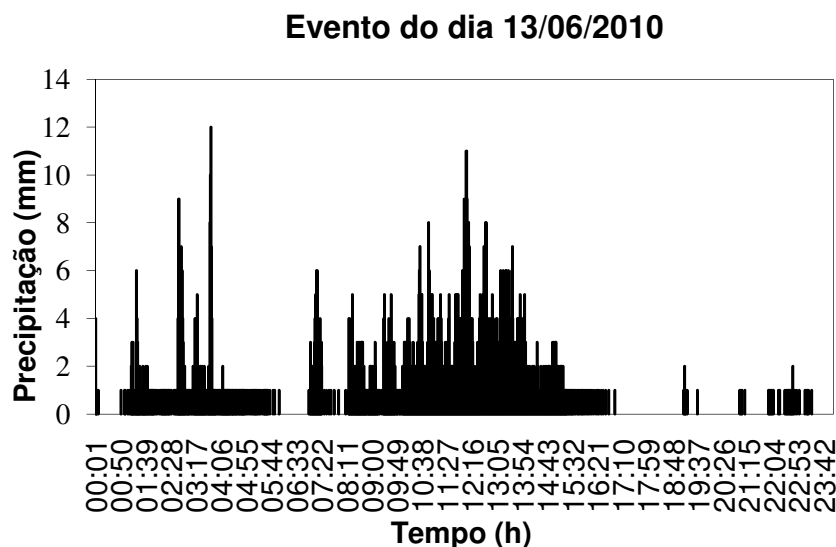


Figura 36. Precipitação ocorrida um dia antes da coleta do solo para análise de ^7Be 2010.

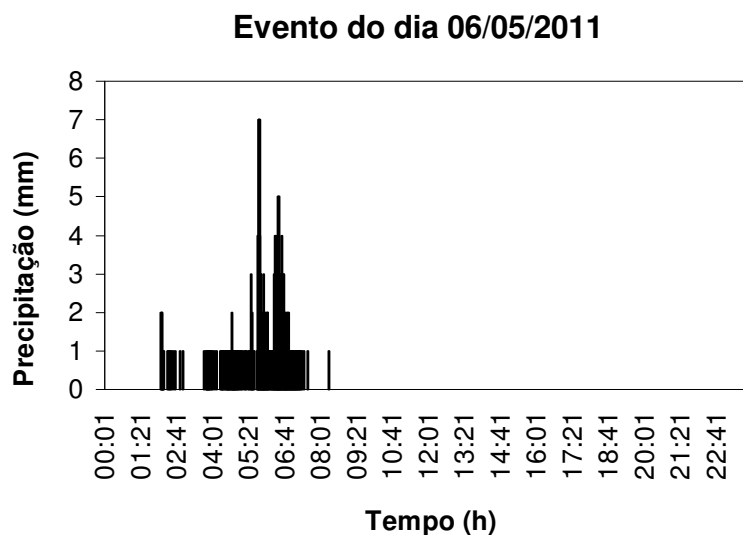


Figura 37. Precipitação ocorrida um dia antes da coleta do solo para análise de ^7Be 2011.

As atividades mássicas de ^7Be na encosta (área potencial de erosão) foram menores que as atividades encontradas na área de topo (também chamada de área de referência) e que na área de deposição em 2010, tendência que se confirma em 2011 (Tabela 11). O número de camadas de 2 mm amostradas em cada posição foi o mesmo, sendo que a profundidade mássica se manteve relativamente constante em todos os casos, bem próxima dos 3 kg m^{-2} .

Como a densidade do solo variou pouco nesses primeiros 10 mm de solo, o produto da profundidade pela atividade mássica (ou concentração de ^7Be), originou dados de atividade de área (ou estoque de ^7Be) que apresentaram a mesma tendência (Tabela 11).

Tabela 11. Valores experimentais médios de profundidade mássica, atividade mássica e de área de ^7Be , determinados em amostras retiradas em camadas sequenciais de 2 mm de espessura, em três posições do relevo, após chuvas intensas nos anos de 2010 e 2011 (n = 3 e n = 5 para 2010 e 2011, respectivamente).

2010				2011		
Camada	Profundidade mássica	Atividade Mássica	Atividade de área	Profundidade mássica	Atividade Mássica	Atividade de área
	kg.m⁻²	Bq. kg⁻¹	Bq. m⁻²	kg.m⁻²	Bq. kg⁻¹	Bq.m⁻²
Topo						
1	3,01	8,76	21,51	2,97	11,2	33,1
2	3,16	7,55	19,29	3,01	9,64	29,1
3	3,16	7,18	18,14	3,02	9,17	27,7
4	3,12	6,67	17,16	3,01	8,66	26,1
5	3,17	6,40	16,78	3,00	8,25	24,8
Encosta						
1	3,05	6,12	18,62	3,03	8,74	26,4

Tabela 11. Continuação dos valores experimentais médios de profundidade mássica, atividade mássica e de área de ^7Be , determinados em amostras retiradas em camadas sequenciais de 2 mm de espessura, em três posições do relevo, após chuvas intensas nos anos de 2010 e 2011 (n = 3 e n = 5 para 2010 e 2011, respectivamente).

2	3,07	5,88	18,03	3,09	8,13	25,1
3	3,06	5,74	17,50	3,07	7,78	23,9
4	3,12	5,35	16,65	3,09	7,41	22,9
5	3,07	5,17	15,83	3,07	6,95	21,3
Deposição						
1	3,02	13,83	41,93	3,05	21,7	66,0
2	3,05	13,19	40,46	3,07	20,3	61,8
3	3,00	12,41	37,34	3,02	19,5	58,7
4	3,04	11,06	33,69	3,05	18,5	56,0
5	3,03	10,46	31,78	3,04	17,8	53,9

As atividades mássicas médias de ^7Be das áreas de referência (topo) foram resumidas nas Figuras 38 e 39, os valores médios foram posicionados na média da profundidade mássica de cada camada. A diminuição da atividade com a profundidade em ambas figuras mostra uma tendência exponencial fraca, em contraste com os dados apresentados por Schuller et al (2006) (Fig. 40).

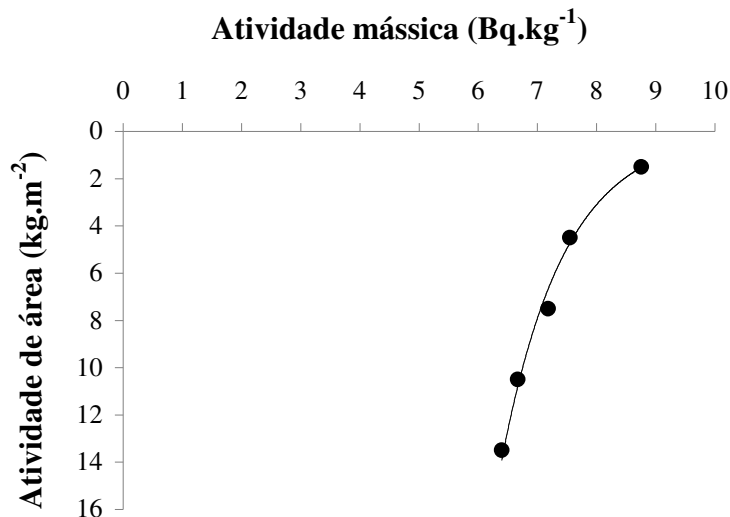


Figura 38. Perfil de distribuição vertical do ^7Be na área de referência em 2010.

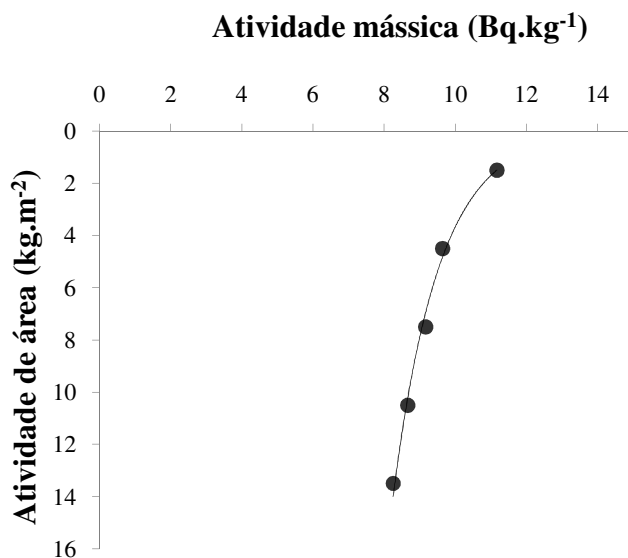


Figura 39. Perfil de distribuição vertical do ⁷Be na área de referência em 2011.

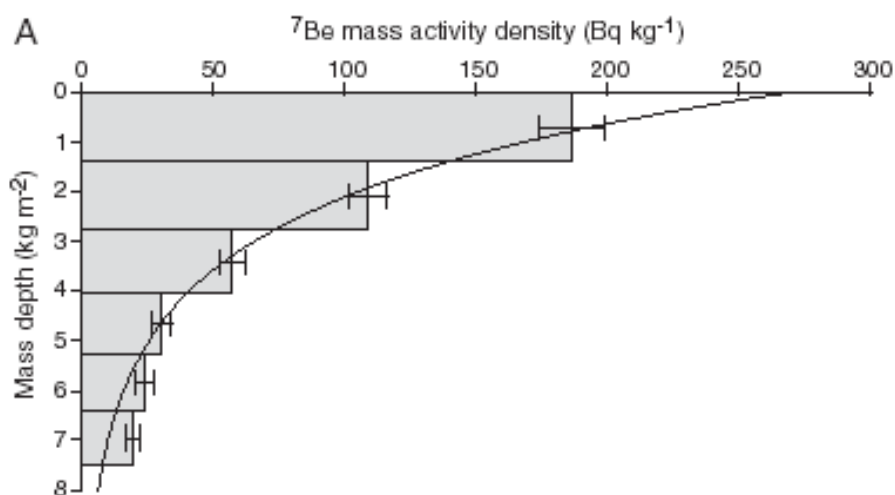


Figura 40. Perfil de distribuição vertical do ⁷Be na área de referência.

Fonte: (Schuller, et al., 2006).

A maior infiltração do ⁷Be na área experimental diminuiu a atividade encontrada em superfície, em relação a encontrada por Schuller et al (2006) o qual, com um valor de 300 Bq.kg⁻¹, (Fig. 40) valida o método do uso do ⁷Be como isótopo traçador de erosão.

Devido a essas diferenças, não foi possível utilizar o sistema de equações apresentado por esses autores, para calcular as quantidades de solo erodido e depositado em cada posição, pois haveria uma incerteza considerável na estimativa dos mm de solo erodidos ou depositados. Independentemente deste fato, os dados dos dois anos são consistentes no sentido de mostrar um estoque menor de ⁷Be na área da encosta e maior na área de deposição, quando comparados com o estoque de ⁷Be determinado na área de referencia (topo). A amostragem e análise de um maior

número de camadas não seria viável, pois a meia vida do ^7Be é de 50 dias e é necessário um dia para contagem de cada amostra. Estes fatores combinados limitam o número total de amostras que pode ser contados, sobretudo, porque, a medida que aumenta a profundidade, a atividade do ^7Be diminui ainda mais e o erro de contagem aumenta.

O ^7Be carregado pela água de chuva ingressa ao solo como B^{+2} , sendo que íons divalentes sofrem retenção pelos coloides do solo (fração argila e matéria orgânica). A maior profundidade de infiltração do ^7Be no presente trabalho, em comparação com dados publicados por Blake et al., (1999), Schuller et al (2006) provavelmente resulta da baixa capacidade de troca cátions (CTC), típica de solos tropicais, assim como dos baixos teores de matéria orgânica do solo na área experimental. O principal mineral de argila nos solos da região tropical é a caulinita, que apresenta uma CTC bem menor que as esmectitas, típicas dos solos de regiões temperadas, como Inglaterra, no caso de Blake et al (1999) e do sul de Chile (Schuller et al., 2006). Neste último caso, é possível que exista também a contribuição de alofanos, material derivado de atividade vulcânica.

4.5. Comparação das três técnicas aplicadas no estudo

Neste trabalho foi efetuado o uso de três técnicas que estimem a produção de sedimentos em bacias hidrográficas. Com o intuito de correlacionar padrões espaciais de erosão e deposição avaliados utilizando medidas diretas em fossas de sedimentação, modelagem hidrossedimentológica e indiretas com ^7Be .

Foi realizado o monitoramento da produção de sedimentos numa microbacia, dentro da Bacia Experimental Riacho Gameleira, localizada no Agreste Pernambucano, utilizando medidas diretas em fossa de sedimentação, onde a coleta foi realizada de sedimentos de arrasto na fossa de sedimentação e de sedimentos em suspensão em um equipamento montado dentro da fossa de sedimentação, no período de 2010 a 2011. Com este monitoramento foi registrada uma série de 50 eventos, 14 eventos 2010 e 34 em 2011. Os dados colhidos em 2010 com uma quantidade bem inferior aos de 2011 em virtude do monitoramento só foi iniciado em junho de 2010, foi metade do inverno já transcorrido.

Ainda dentro do trabalho de campo foi realizada a análise das concentrações dos nutrientes do solo, sendo eles: carbono, fósforo e potássio nos sedimentos colhidos na fossa de sedimentação. Este estudo foi necessário, pois faz uma integração multidisciplinar ao trabalho, focando não só a questão da engenharia, ou seja, a quantificação da produção de sedimentos, mas analisa a questão ambiental como um todo. O desafio foi quantificar os teores de carbono, nitrogênio, fósforo e potássio no solo que ficavam retidos na fossa de sedimentação após um evento chuvoso. E com os resultados foi observado que a perda de sedimento registrada no presente estudo é elevada, se

comparada aos dados disponíveis para a região NE, com valores de precipitação pluviométrica até maiores.

Em sequência ao trabalho de campo foi realizada a modelagem hidrossedimentológica da microbacia utilizando um modelo hidrossedimentológico distribuído para estimar os padrões espaciais de erosão e deposição de sedimentos, o modelo KINEROS2. O modelo foi devidamente calibrado, validado e testado e comprovada a aplicabilidade de parâmetros médios regionais determinados por Srinivasan e Paiva (2009) utilizando os dados da Bacia Experimental Riacho Gameleira localizada na zona da Mata Pernambucana e a Bacia Experimental de São João do cariri, localizada no Cariri Paraibano.

E finalmente foi iniciado o estudo da distribuição vertical de ^7Be em solo em uma encosta dentro da microbacia, após a ocorrência de chuvas erosivas, para se observar a viabilidade de se utilizar o ^7Be como traçador de erosão. Este tipo de estudo já foi realizado anteriormente, em uma área de floresta no Chile por Schuller et al (2006), com o clima, solo e características hidrológicas totalmente distintas as encontradas na Zona da Mata Pernambucana. Schuller et al., (2006) encontraram resultados satisfatórios conseguindo fazer a aplicação da técnica para avaliar a produção de sedimentos. Neste trabalho, a técnica do ^7Be mostra seu potencial confirmado. Mas conseguiu-se determinar o perfil de atividade do ^7Be no solo da BERG e mostrar a baixa atividade do mesmo e com isso sua inviabilidade da utilização da técnica desenvolvida por Schuller et al (2006). Outra questão discutida anteriormente foi o fato do perfil de distribuição vertical do ^7Be na área de referência para os 2 anos estudados, 2010 e 2011, não terminar em zero, como se observa nos estudo de outros autores como Schuller et al. (2006), onde o perfil de distribuição termina em zero. Logo se observou que poderiam ter sido retiradas mais amostras para fechar o perfil em zero, ou seja, em uma camada que não tivesse nenhum ^7Be .

Este trabalho contribuiu no estudo de três técnicas: medidas diretas na fossa de sedimentação e a análise dos nutrientes do solo, medidas indiretas utilizando um isótopo traçador e a realização da modelagem hidrossedimentológica com o intuito de calibrar o modelo para a região. Estas técnicas auxiliam no planejamento do uso racional dos recursos naturais e do uso e manejo do solo e a desenvolver um instrumento que possa servir para tentar minimizar os problemas da erosão, desertificação e assoreamento dos cursos d'água, que por consequência comprometem os solos e os recursos hídricos, e que venha ajudar a colocar em prática a Política Estadual de Combate a Desertificação e Convivência com o Semi-árido do Estado de Pernambuco.

No capítulo seguinte serão apresentadas as conclusões e recomendações dos resultados apresentados neste capítulo, das três técnicas aplicadas na microbacia experimental dentro Bacia Experimental Riacho Gameleira.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

5.0. CONSIDERAÇÕES GERAIS

Os estudos apresentaram a aplicação do modelo de base física KINEROS2, na estimativa da produção de sedimentos, que mostram a importância de estudos em bacia experimentais, pois são elas as melhores fontes de dados e informações para avaliar o modelo de simulação, onde os dados climatológicos e hidrossedimentológicos são coletados nas condições controladas e de forma sistemática. Pois mostram que um modelo bem calibrado e válido, através de dados colhidos em campo, pode servir como uma ferramenta muito útil para construir séries sintéticas de vazão e erosão, e ajudar na gestão das Bacias Hidrográficas.

O parâmetro *cf* é relativamente insensível, mas é o principal no processo da erosão em planos. A faixa da variação deste parâmetro é muito grande, portanto a obtenção do seu valor representativo regional deve ser feita com um maior número dos eventos num maior número das bacias possíveis.

Os resultados obtidos na Bacia Experimental do riacho Gameleira se mostraram promissores e a utilização destes estudos iniciais servirá como base para nortear as futuras pesquisas e trabalhos de campo na área de monitoramento hidrológico e estudos de erosão hídrica na Bacia do Riacho Gameleira. Porém, estudos utilizando resultados de ensaios em campo tendem a mostrar resultados mais próximos da realidade, incluindo estudos com os isótopos traçadores propostos na metodologia deste trabalho. Os resultados reforçam a necessidade de se ter uma base de monitoramento longa de vazão e produção de sedimentos na região.

5.1. Conclusões

1. O amostrador de sedimentos em suspensão e a fossa de sedimentação tiveram funcionamentos eficazes, registrando eventos pequenos e grandes no curso d'água perene na Microbacia Experimental.

2. A produção média de sedimentos na microbacia foi estimada em $7,33 \text{ ton.ha}^{-1}.\text{ano}^{-1}$. Tendo em vista os diversos usos e ocupação do solo da Microbacia Experimental, avalia-se que a microbacia apresenta taxa de erosão considerada como baixa.

3. As perdas de totais de carbono, potássio e fósforo registrados nas amostras de solos na área de estudo foram $7,4 \text{ g.kg}^{-1}$, $2,6 \text{ g.kg}^{-1}$ e $0,8 \text{ g.kg}^{-1}$ respectivamente. Para repor as perdas de potássio perdido no solo teria que se gastar 2.740.083,00 reais/kg e para o fósforo 53.172.000,00 reais/kg, valores bem consideráveis. Isto mostra a necessidade da proteção dos solos e do desenvolvimento de técnicas para minimizar a problemática da erosão nas Bacias Hidrográficas.

4. A utilização do ^7Be para estudo de erosão na microbacia experimental não se mostrou adequado para determinação de erosão laminar, devido a acentuada infiltração deste elemento no solo, o que diminui sua sensibilidade para este tipo de estudos.

5. Logo o que se conclui das três técnicas é que medidas diretas na fossas de sedimentação, a modelagem hidrossedimentológica e a análise dos nutrientes do solo são técnicas que se complementam e juntas formam um estudo completo.

5.2. Recomendações

1. É necessário continuar os estudos da produção de sedimentos, nas Bacias Hidrográficas do Nordeste Brasileiro, pois, para se obter resultados o mais próximo possível da realidade é necessário uma série longa e confiável de dados de campo, para que se possam gerar resultados o mais próximos da realidade possível.

2. Devem-se extrapolar os resultados em outras escalas e aproveitando o modelo hidrossedimentológico KINEROS2 que já foi devidamente calibrado, validado e testado sua aplicabilidade, para realizar a modelagem da Bacia do Rio Tapacurá. Local onde a Bacia Experimental Riacho Gameleira está inserida.

3. Aprofundar as investigações sobre a existência de uma relação entre os parâmetros de erosão do modelo KINEROS2 e índices que reflitam as condições físicas do solo na Bacia;

4. Estudar a influência do processo da discretização nos resultados finais através do uso de esquemas diferentes de formas dos elementos.

CAPÍTULO 6

BIBLIOGRAFIA

6.0. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACHITE, M.; OUIILLON, S. **Suspended sediment transport in a semiarid watershed**, Wadi Abd, Algeria (1973–1995). *Journal of hydrology*, 343(2), pp. 187-202, 2007.

ABBOTT, M. B.; J.C. BATHURST; J.A. CUNGE; P. E. O'CONNELL e J.R. RASMUSSEN. **An introduction to the European Hydrological System - Système Hydrologique Européen, 'SHE', 1: History and philosophy of a physically-based, distributed modeling system**. *J. Hydrol.*, Vol.87, p. 45-59, 1986a.

ALBUQUERQUE, A.W.; LOMBARDI NETO, F.; SRINIVASAN, V.S. **Efeito do desmatamento da caatinga sobre as perdas de solo e água de um Luvisolo de Sumé- PB**. *R. Bras. Ci. Solo*, 25:121-128, 2001.

AL-QURASHI, A.; McINTYRE, N.; WHEATER, H.; UNKRICH C. **Application of the KINEROS2 rainfall–runoff model to an arid catchment in Oman**. *Journal of Hydrology*, 355, p. 91-105, 2008.

ANDRELLO, A. C.; APPOLPNI, C. R. e GUIMARÃES, M. F. **Uso do Césio-137 para avaliar taxas de erosão em cultura de soja, café e pastagem**, *R. Brás. Ci. Solo*, 27:223-229, 2003.

ARAGÃO, R. **Estimativa dos Parâmetros do Modelo Distribuído WESP com os Dados da Bacia Experimental de Sumé - PB**. Dissertação de mestrado, 2000.

ARAGÃO, R; FIGUEIREDO, E. E.; SRINIVASAN, V. S.; DALTRO FILHO, J. **Avaliação do Processo Hidrossedimentológico na Bacia do Riacho Japarutuba-Mirim através do Modelo KINEROS2**. *Anais do IX Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste*. Salvador-BA: ABRH, v. 1. CD-ROM, 2006.

ARAÚJO FILHO, P. F. **Modelagem hidrológica, com implantação de um limite máximo no déficit hídrico do modelo TOPMODEL, e aplicação na região de transição entre a Zona da Mata e o Agreste pernambucano**. Tese de doutorado do Departamento de Energia Nuclear da UFPE, 2004.

ARAÚJO, J.C.; KNIGHT, D.W. **A review of measurement of sediment yield in different scales**. *Rem: Revista Escola de Minas, Ouro Preto*, 58(2), 257-266, 2005.

ÁVILA, V. B. **Relação entre o uso e manejo do solo em uma bacia rural e a construção de nitrogênio, fósforo e sedimentos a corpus hídricos**. Dissertação de

Mestrado. Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, 2 e 3 p, 2005.

BACCHI, O. O. S.; REICHARD, K.; SPAROVEK, G. RANIERI, S. B. L. **Soil erosion evaluation in a watershed in Brazil through ^{137}Cs fallout redistribution analysis and conventional models.** Acta Geológica Hispanica, v. 35, n. 3-4, p. 251-259, 2000.

BANDEIRA, J. V. **Estúdio 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 de Engenharia de Sedimentos, Belo Horizonte. ABRH, p. 325-333, 1998.

BATHURST, J.C. Physically-based distributed modelling of an upland catchment using the **Système Hydrologique Européen**. J. Hydrol., 87, p. 79-102, 1986.

BERTOL, I.; LEITE, D.; GUADAGNIN, J.C. & RITTER, S.R. **Erosão hídrica em um Nitossolo Háplico submetido a diferentes sistemas de manejo sob chuva simulada: II. Perdas de nutrientes e carbono orgânico.** R. Bras. Ci. Solo, 28:1045-1054, 2004.

BLAKE, W. H.; WALLING, D. E.; HE, Q. **Fallout beryllium-7 as a tracer in soil erosion investigations.** Applied Radiation and Isotopes, 599-605, 1999.

BRAGA, R.A.P. **Gestão ambiental da bacia do Riacho Tapacurá – Plano de ação.** Ed. Universitária da UFPE, Recife, 101 p, 2001.

BOLIVAR, J. P.; GARCÍA-TENORIO, R.; GARCÍA-LEÓN, M. **A method for the determination of counting efficiencies in γ -spectrometric measurements with HPGe detectors.** Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A. v. 382, p. 495-502, 1996.

BONNIWELL, E.C. **Evaluating soil erosion and sediment transport with radionuclides.** Ph.D. diss. Case Western Reserve Univ., OH, 2001.

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

CADIER, E.; FREITAS, B. J. E LEPRUN J. C. **Bacia Experimental de Sumé-PB: Instalação e Primeiros Resultados.** Recife, SUDENE, 87p, 1983.

CANTALICE, J.R.B.; BEZERRA, S.A.; FIGUEIRA, S.B.; INÁCIO, E.S.B. & SILVA, M.D.R.O. **Linhas isoerosivas do estado de Pernambuco – 1ª aproximação.** Caatinga, 22:75-80, 2009.

CANTÓN, Y.; DOMINGO, F.; SOLÉ-BENET, A.; PUIGDEFÁBREGAS, J. **Hydrological and erosion response of a badlands system in semiarid SE Spain.** Journal of Hydrology, 252(1), pp. 65-84, 2001.

CARVALHO, N.O. **Hidrossedimentologia prática.** CPRM, Rio de Janeiro - RJ, pp. 372, 2001.

CLAPP, E.M.; BIERMAN, P.R.; SCHICK, A.P.; LEKACH, J.; ENZEL, Y.; CAFFEE, M. **Differing rates of sediment production and sediment yield.** *Geology*, 28(11), pp. 995-998, 2000.

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

CLAPP, E.M.; BIERMAN, P.R.; SCHICK, A.P.; LEKACH, J.; ENZEL, Y. & CAFFEE, M. **Differing rates of sediment production and sediment yield.** *Geology*, 28: 995-998, 2000.

CORRECHEL, V. **Avaliação de índices de erodibilidade do solo através de técnica da análise de redistribuição do “Fallout” do ^{137}Cs .** Tese de doutorado do Centro de Energia Nuclear na Agricultura - USP, São Paulo, 2003.

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. PPGE/CCT/UFCG Campina Grande, 195 p, 2004.

DEDECEK, R.A.; RESK, D.V.S. & FREITAS, J.E. **Perdas de solo, água e nutrientes por erosão em Latossolo Vermelho-Escuro dos Cerrados em diferentes cultivos sob chuva natural.** *R. Bras. Ci. Solo*, 10:265-272, 1986.

DUN, S.; WU, J. Q.; ELLIOT, W. J.; PETER R.; ROBICHAUD, D.; FLANAGAN C.; FRANKENBERGER, J. R.; BROWN, R. E.; XU, A. C. **Adapting the Water Erosion Prediction Project (WEPP) model for forest applications.** *Journal of Hydrology* 366, 46–54. doi:10.1016/j. hydrol.2008.12.019, 2009.

DUTRA, M. T. D. **Uso dos recursos hídricos e florestais e sua relação com áreas de preservação permanente na bacia experimental do riacho Gameleira, afluente do Tapacurá- PE.** Dissertação de mestrado da Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2005.

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes.** Brasília: Embrapa Solos/Embrapa Informática Agropecuária/Embrapa Comunicação para Transferência de Tecnologia, 370p 1999.

Fraga, V.S. e Salcedo, I.H. **Declines of organic nutrient pools in tropical semi-arid soils under subsistence farming.** *Soil Science Society of America Journal* 68:215-224, 2004.

FEELY, H.W., R.J. LARSEN, and C.G. SANDERSON. **Factors that cause seasonal variations in beryllium-7 concentrations in surface air.** *J. Environ. Radioact.* 9:223–249, 1989.

FERRO, V. **Further remarks on a distributed approach to sediment delivery.** *Hydrol. Sci. J.*, 42, p.633-647, 1997.

FIGUEIREDO, E. E. **Scale Effects and Land Use Change Impacts in Sediment Yield Modelling in a Semi-arid Region of Brazil**, Ph.D Thesis, Department of Civil Engineering, University of Newcastle upon Tyne, Newcastle, UK, 1998.

FLANAGAN, D.C. e NEARING, M.A. **USDA Water Erosion Prediction Project: hill slope profile and watershed model documentation**. NSERL Report no. 10, USDA-ARS National Soil Erosion Research Laboratory, West Lafayette, 1995.

FRAGA, V.S.; SALCEDO, I. H. **Declines of Organic Nutrient Pools in Tropical Semi-Arid Soils under Subsistence Farming**. Soil Sci. Soc. Am. J. 68:215-224, 2004.

FROEHNER, S.; MARTINS, R. F. **Avaliação da composição química de sedimentos do Riacho Barigui na região metropolitana de Curitiba**. Revista Química. Nova, Vol. 31, No. 8, 2020-2026, 2008.

FURTUNATO, O.M.; SOUZA, E.S.; SOARES, W.A.; ANTONINO, A.C.D.; MONTENEGRO, S.M.G.L.; OLIVEIRA, L.M.M. & SILVA, A.M. **Características hidrodinâmicas de solos numa parcela da bacia experimental do riacho Gameleira – PE**. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 17., São Paulo, 2007. Anais. Porto Alegre, ABRH, 2009.

GUADAGNIN, J.C.; BERTOL, I.; CASSOL, P.C. & AMARAL, A.J. **Perdas de solo, água e nitrogênio por erosão hídrica em diferentes sistemas de manejo**. R. Bras. Ci. Solo, 29:277-286, 2005.

GALVÃO, C. O. **Modelagem do Escoamento Superficial e da Erosão do Solo em Microbacias**. Dissertação de mestrado, 1990.

GELFAN, A. N. **Prediction of runoff in poorly gauged basins using a physically based model**. In: Prediction in Ungauged Basins: Approaches for Canada's Cold Regions. Toronto: Canadian Water Resources Association, p. 101-118, 2005.

GERASOPOULOS, E., C.S. ZEREFOS, C. PAPASTEFANOU, P. ZANIS, and K. O'BRIEN. **Low-frequency variability of beryllium-7 surface concentrations over the Eastern Mediterranean**. Atmos. Environ. 37:1745–1756, 2003.

GOVERS, G.; T.A. QUINE; P.J.J. DESMET e D.E. WALLING. **The relative contribution of soil tillage and overland flow erosion to soil redistribution on agricultural land**. Earth Surf. Proc. Landforms, 21, p. 929-946, 1996.

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

HORTON, R. E. **The Role of Infiltration in the Hydrologic Cycle**. Trans. Am. Geophys. Union, 14: 446-460, 1933.

HAWLEY, N., J.A. ROBBINS, and B.J. EADIE. **The partitioning of 7-beryllium in fresh water**. Geochim. Cosmochim. Acta 50:1127–1131, 2004.

LEITE, M.H.S.; COUTO, E.G.; AMORIM, R.S.S; COSTA, E.L. & MARASCHIN, L. **Perdas de solo e nutrientes num latossolo vermelho-amarelo ácrico típico, com diferentes sistemas de preparo e sob chuva natural.** Rev. Bras. Ciênc. Solo, 33: 689-699, 2009.

IAEA. **Use of ^{137}Cs in the study of soil erosion and sedimentation.** IAEA- TECDOC-1028, IAEA, Vienna, Austrália, 1998.

INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIATION UNITS AND MEASUREMENTS. **Quantities, units and terms in radioecology.** Nucl. Tech. Publishing. Rep. 65. IRCU, Ashford, Kent, UK, 2001.

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.

KASTE, J.M.; S.A. NORTON; and C.T. HESS. **Environmental chemistry of beryllium-7.** Rev. Mineral. Geochem. 50:271–289, 2002.

KOCH, D.M., and M.E. MANN. **Spatial and temporal variability of ^7Be surface concentrations.** Tellus Ser. B 48B:387–396. Reproduced from Journal of Environmental Quality. Published by ASA, CSSA, and SSSA. All copyrights reserved, 1996.

LAL, D.; P.K. MALHOTRA and B. PETERS. **On the production of radioisotopes in the atmosphere by cosmic radiation and their application to meteorology.** J. Atmos. Terr. Phys. 12:306–328, 1958.

LAL, D., and H.E. SUESS. **The radioactivity of the atmosphere and hydrosphere.** Annu. Rev. Nucl. Sci. 18:407–434, 1968.

LANE, L.J. e M.A. NEARING. **Water Erosion Prediction Project landscape profile model documentation.** NSERL Rep. No. 2, NSERL, ARS, USDA, Purdue Univ., West Lafayette, 1989.

LEITE, M.H.S.; COUTO, E.G.; AMORIM, R.S.S; COSTA, E.L. & MARASCHIN, L. **Perdas de solo e nutrientes num latossolo vermelho-amarelo ácrico típico, com diferentes sistemas de preparo e sob chuva natural.** Rev. Bras. Ciênc. Solo, 33: 689-699, 2009.

LOPES, V. L. (1987). **A numerical model of watershed erosion and sediment yield.** Tucson, PhD Dissertation, University of Arizona, EUA, 1987.

LOPES, W.T.A. **Efeitos de escala na modelagem hidrossedimentológica na região semiárida da Paraíba,** Campina Grande, 174 p, 2003.

LOPES, V.L. e CANFIELD, H.E. **Effects of Watershed Representation on Runoff and Sediment Yield Modeling.** Journal of the American Water Resources Association (JAWRA) 40(2):311-319, 2004.

- LOU, R. F. **Modelagem hidrológica chuva-vazão e hidrodinâmica aplicada na bacia experimental do rio piabanha/ RJ**. Dissertação de mestrado no Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2010.
- LU, H.; MORAN, C. J.; PROSSER, I. P. **Modelling sediment delivery ratio over the Murray Darling Basin**. *Environmental Modelling & Software* 21, 1297 e 1308, 2006.
- MACHADO, R.L.; RESENDE, A.S.; CAMPELLO, E.F.C.; OLIVEIRA, J.A. & FRANCO, A.A. **Soil and nutrient losses in erosion gullies at different degrees of restoration**. *R. Bras. Ci. Solo*, 34:945-954, 2010.
- MALANCA, A.; PESSINA, V.; DALLARA, G. **Assesment of the natural radioactivity in the Brazilian State of Rio Grande do Norte**. *Health Physics*. v. 65, n. 3, p. 298-302, 1993.
- 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.
- MATISOFF, G.; E.C. BONNIWELL, and P.J. Whiting. **Soil erosion and sediment sources in an Ohio watershed using beryllium-7, cesium-137, and lead-210**. *J. Environ. Qual.* 31:54–61, 2002.
- MATISOFF, G.; BONNIWELL, E. C. and WHITING, P. J. **Radionuclides as Indicators of Sediment Transport in Agricultural Watersheds that Drain to Lake Erie**. Published in *J. Environ. Qual.* 31:62–72. 2002.
- MICHAUD, J. D.; SOROOSHIAN, S. **Comparison of simple versus complex distributed runoff models on a midsized semiarid watershed**. *Water Resources Research*, v.30, n.3, p. 593-606, 1994.
- MURPHY, J. & RILEY, J.P.A. **A modified simple solution method for the determination of phosphate in natural waters**. *Anal. Chim. Acta*, 27: 31-36, 1962.
- NEARING, M.A.; G.R. FOSTER; L.J. LANE e S.C. FINKNER. **A process-based soil erosion model for USDA-Water Erosion Prediction Project technology**. *Transact. Amer. Soc. Agr. Eng*, 1989.
- NEARING, M.A.; NICHOLS, M.H.; STONE, J.J.; RENARD, K.G.; SIMANTON, J.R. (2007). **Sediment yields from unit-source semiarid watersheds at Walnut Gulch**. *Water Resources Research*, 44, W05S12.
- NICHOLS, M.H. **Measured Sediment Yield Rates From Semiarid Rangeland Watersheds**. *Rangeland Ecology & Management*, 59(1), pp. 55-62. 2006.
- PAIVA, F. M. L. **Estudo comparativo entre três modelos de base física na modelagem hidrossedimentológica em microbacias na região semi-árida paraibana**. 135p. Dissertação (Mestrado) – Campina Grande, Universidade Federal de Campina Grande. 2008.

PAIVA, F. M. L.; SRINIVASAN, V. S.; SANTOS, C. A. G.; TAVEIRA, I. L. M. **Modelagem hidrossedimentológica com KINEROS2 para as micro-bacias experimentais de São João do Cariri.** Anais do XVII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos e do VIII Simpósio de Hidráulica e Recursos Hídricos dos Países de Língua Oficial Portuguesa. São Paulo: ABRH, 2007.

PAIVA, F.M.L.; ARAÚJO FILHO, P.F.; SILVA, R.M.; SILVA, L.P.; MONTENEGRO, S.M.G.L. & AZEVEDO, J.R.G. **Concentração de sedimentos em suspensão em uma pequena bacia rural no Nordeste do Brasil.** In: SIMPÓSIO NORDESTINO DE RECURSOS HÍDRICOS, 12., Fortaleza, 2010. Anais. Porto Alegre, ABRH, 2010.

PANDEY, A.; CHOWDARY, V.M.; MAL, B.C.; BILLIB, M. **Runoff and sediment yield modeling from a small agricultural watershed in India using the WEPP model.** Journal of Hydrology 348, 305– 319, doi:10.1016/j.jhydrol.2007.10.010, 2008.

PAPACHRISTODOULOU, C. A.; ASSIMAKOPOULOS, P. A.; PATRONIS, N. E.; IOANNIDES, K. G. **Use of HPGe γ -ray spectrometry to assess the isotopic composition of uranium in soils.** Journal of Environmental Radioactivity. v. 64, p. 195-203, 2003.

PAPASTEFANOU, C. and A. IOANNIDOU. **Beryllium-7 and solar activity.** Appl. Radiat. Isot. 61:1493–1495, 2004.

PEREIRA, J. A. **Modelagem do Escoamento Superficial e da Erosão em Microbacias na Bacia Experimental de Sumé – PB.** Dissertação de Mestrado, 1997.

POMEROY, J. W.; GRANGER, R. J.; HEDSTROM, N. R. **The process hydrology approach to improving prediction of ungauged basins in Canada.** In: Prediction in Ungauged Basins: Approaches for Canada's Cold Regions. Toronto: Canadian Water Resources Association, 2005.

RENNÓ, C. D. & SOARES, J. V. **Modelos Hidrológicos para Gestão Ambiental.** Relatório Técnico Parcial. Dezembro, 2000.

RISSE, L.M.; NEARING, M.A.; SAVABI, M.R. **Determining the Green-Ampt effective hydraulic conductivity from rainfall-runoff data for the WEPP model.** Transactions of ASAE, 37: p.411-418, 1994.

RITCHIE, J. C. e MCHENRY, J. R. **Applications of radioactive fallout cesium-137 for measuring soil erosion and sediment accumulation rates and patterns; a review.** J Environ. Qual., 19-215-233, 1990.

RÓDENAS, J.; PASCUAL, A.; ZARZA, I.; SERRADELL, V.; ORTIZ, J.; BALLESTEROS, L. **Analysis of the influence of germanium dead layer on detector calibration simulation for environmental radioactive samples using the Monte Carlo method.** Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. v. 496, p. 390-399, 2003.

de ROO, A.P.J. e D.E. WALLING. **Validating the ANSWERS soil erosion model using 137Cs**. In: R.J.Rickson (ed.), *Conserving soil resources: European perspective*, CAB, Wallingford, UK, p. 246-263, 1994.

de ROO, A.P.J., WESSELING, C.G. e RITSEMA, C.J. **LISEM: a single event physically-based hydrological and soil erosion model for drainage basins: I – theory**, input and output. *Hydrol. Process.* 10(8), 1107-1117, 1996.

ROVEY, E. W.; WOOLHISER, D. A.; SMITH, R. E. **A distributed kinematic model of upland watershed**. Hydrology Paper 93, Colorado State University, Fort Collins, 1977.

SAID, A.; STEVENS, D; SEHLKE, G. **Relation of land-use of to total nitrogen/phosphorus in streams** em: emcr.usu.edu/tmdl/ineel/abstracts/papernp.pdf. Acessado em: 02/04/2004.

SALCEDO, I.H. E SAMPAIO, E.V.S.B. **Matéria orgânica do solo no bioma caatinga**. In: Santos, G.A.; Silva, L.S.; Canellas, L.P.; Camargo, F.A.O. (Eds.) *Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais*. Porto Alegre, Metrópole, p. 419-441, 2008.

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*, n. 22, p. 115-122, 1998.

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

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

SANTOS, A.C. E SALCEDO, I.H. **Relevo e fertilidade do solo em diferentes estratos da cobertura vegetal na bacia hidrográfica da represa Vaca Brava, Areia, PB**. *Revista Árvore*, 34 (2):277-285, 2010.

SANTOS, C.A.G.; SILVA, R.M. **Assessing erosion using WEPP model with GIS for an experimental basin in northeastern Brazil**. *Proceedings of the XXIV General Assembly IUGG*, Perugia, Italy, IAHS, 2007.

SANTOS, C.A.G.; SUZUKI, K.; WATANABE, M.; SRINIVASAN, V.S. **Influência do tipo da cobertura vegetal sobre a erosão no semi-árido paraibano**. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 4(1): p.92-96, 2000.

SANTOS, C. A. G.; SUZUKI, K.; LOPES, W. T. A. **Sediment yield in Ishite watershed using a runoff-erosion kinematic model**. *Proceedings of IAHR Congress*, 29, Beijing: IAHR, v.2, p.146-151, 2001.

SANTOS, C. A. G.; SILVA, R. M.; SRINIVASAN, V. S. **Análise das perdas de água e solo em diferentes coberturas superficiais no semi-árido da Paraíba.** OKARA: Geografia em debate, v.1, n.1, p.16-32, 2007.

SANTOS, G. G.; G. N. P.; O. F. **Precipitação intensas relacionadas à erosão hídrica.** Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental v.14, n.2, p.115–123, Campina Grande, PB, 2010.

SANTOS, I.; FILL, H. D.; SUGAI, M. R. V. B.; BUBA, H.; KISHI, R. T. MARONE, E.; LAUTERT, L. F. **Hidrometria aplicada.** Instituto de pesquisa para o desenvolvimento, p. 262-263, Curitiba, 2001.

SANTOS, C. A. G.; PAIVA, F. M. L.; SILVA, R. M. **Evaluation of a runoff-erosion model in Experimental Basin of the Northeast of Brazil.** IAHS Publication (VII IAHS Scientific Assembly), in Foz do Iguaçu, 2005.

SANTOS, L.L.; SRINIVASAN, V. S.; ARAGÃO, R.; RIBEIRO, P.J.M.. **Avaliação da Resposta do Modelo KINEROS2 para Diferentes Representações da Bacia Hidrográfica.** In: XVII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos e 8º Simpósio de Hidráulica e Recursos Hídricos dos Países de Língua Oficial Portuguesa, SÃO PAULO. ABRH, 2007. v. 1. p. 1-18, 2007.

SANTOS, L. L. **Estudo do efeito de escala sobre os parâmetros dos modelos na região semiárida paraibana.** 135p. Dissertação (Mestrado) – Campina Grande, Universidade Federal de Campina Grande. 2008.

SCAPIN, J.; PAIVA, J.B.D. & BELING, F.A. **Avaliação de métodos de cálculo do transporte de sedimentos em um pequeno rio urbano.** Rev. Bras. Rec. Hídricos, 12:5-21, 2007.

SCHAEFER, C.E.R.; SILVA, D.D.; PAIVA, K.W.N.; PRUSKI, F.F.; ALBUQUERQUE FILHO, M.R. & ALBUQUERQUE, M.A. **Perdas de solo, nutrientes e matéria orgânica e efeitos microestruturais em Argissolo-Veremlho-Amarelo sob chuva simulada.** Pesq. Agropec. Bras., 37: 669-678, 2002.

SOLÉ-BENET, A.; CANTÓN, Y.; DOMINGO, F. **Long term hydrological monitoring of two micro-catchments in semiarid SE Spain.** UNESCO, Paris, IHP-VI Technical Documents in Hydrology, n. 67, 2003.

SNYDER, J.D.; TROFYMOW, J.A. **A rapid accurate wet oxidation diffusion procedure for determining organic and inorganic carbon in plant and soil sample.** In Comm. Soil Sci. Plant Anal. 15 (5): 587-597, 1984.

SCHULLER, P., D.E. WALLING; A. SEPULVEDA; R.E. TRUMPER, J.L. ROUANET, I. PINO, AND A. CASTILLO. **Use of ¹³⁷Cs measurements to estimate changes in soil erosion rates associated with changes in soil management practices on cultivated land.** Appl. Radiat. Isot. 60: 759–766, 2004.

SCHULLER P.; IROUME A.; WALLING D. E.; MANCILLA E. B., CASTILLO A.; TRUMPER R. E. **Use of Beryllium-7 to Document Soil Redistribution following**

Forest Harvest Operations. J. Environ. Qual., Vol. 35, p. 1756-1763, September–October, 2006.

SEEGER, M.; ERREA, M.P.; BEGUERÍA, S.; ARNÁEZ, J.; MARTÍ, C. & GARCÍA-RUIZ, J.M. **Catchment soil moisture and rainfall characteristics as determinant factors for discharge/suspended sediment hysteretic loops in a small headwater catchment in the Spanish pyrenees.** J. Hydrol., 288:299-311, 2004.

SEMMENS, D. J.; GOODRICH, D. C.; UNKRICH, C. L.; SMITH, R. E.; WOOLHISER, D. A.; MILLER, S. N. **KINEROS2 and the AGWA modeling framework.** In: Wheeler, H. S.; SOROOSHIAN, S.; SHARMA, K. D. (Eds.), **Hydrological modeling in arid and semiarid areas.** Cambridge University Press, Cambridge, p. 41-48, 2008.

SEPULVEDA A.; P. SCHULLER; D.E. WALLING; A. CASTILLO. **Use of ⁷Be to document soil erosion associated with a short Riachod of extreme rainfall.** Journal of Environmental Radioactivity 99, 35 e 49, 2008.

SILVA, R. V. **Análise comparativa de três formulações do topmodel na bacia do rio Pequeno - PR.** Dissertação de mestrado, Programa de Pos-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, 2004.

SILVA, R.M.; SILVA, L.P.; MONTENEGRO, S.M.G.L. & SANTOS, C.A.G. **Análise da variabilidade espaço-temporal e identificação do padrão da precipitação na Bacia do Rio Tapacurá, Pernambuco.** Sociedade & Natureza, 22:357-372, 2010.

SING, V. P. **Kinematic wave modeling in water resources.** John Wiley and Sons, Inc., U.S.A. 1996.

SMITH, R. E. E PARLANGE, J. Y. **A Parameter-Efficient Hydrologic Infiltration Model.** Water Res. Res., 14(3): 533-538, 1978.

SMITH, R. E. E WOOLHISER, D. A. **A kinematic model for surface mine sediment yield.** Trans. of Ani. Soc. Agr. Eng., 24 (6): 1508-1514, 1981.

SMITH, R. E., CORRADINI, C. E MELONE, F. **Modeling Infiltration for Multistorm Runoff Events.** Water Resources Research, 29(1): 133-144, 1995.

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

SRINIVASAN, V. S. ARAGÃO, R., MORAES, H. A.; SANTOS, L. L. **Applicability of the Model KINEROS2 for the Semiarid Basins of the North-East of Brazil.** In: Proceedings of 15TH Congress of Asia and Pacific Division of the IAHS and International Symposium on Maritime Hydraulics, 2006, Chennai, India: IAHS, 2006. v. 1. p.1, 2006.

SRINIVASAN, V. S.; PAIVA, F. M. L. **Regional validity of the parameters of a distributed runoff-erosion model in the semi-arid region of Brazil.** Science in China Series E-Technological Sciences, v. 52, n. 11, p. 3348-3356, 2009.

STEINER, F. **Formas de potássio em solos do Estado do Paraná e sua disponibilidade para as plantas em cultivos sucessivos**. Dissertação (Mestrado)– Marechal Cândido Rondon, Paraná, Universidade Estadual do Oeste do Paraná. 2008.

SPAROVEK, G.; BACCHI, O. O. S.; SCHNUG, E.; RANIERI, S. B. L.; DEMARIA, I. C. **Comparison of three water erosion prediction methods (^{137}Cs , WEPP, USLE) in the southeast Brazilian sugarcane production**. Journal of Agriculture In: The Tropics And Subtropics, Witzzenhausen, v. 101, n. 2, p. 107-118, 2000.

SUJO, L. C.; CABRERA, M. E. M.; VILLALBA, L.; VILLALOBOS, M. R.; MOYE, E. T.; LEÓN, M. G.; GARCIA-TENORIO, R.; GARCÍA, F. M.; PERAZA, E. F. H.; AROCHE, D. S. **Uranium-238 e thorium-232 series concentrations in soil, radon-222 indoor and drinking water concentrations and dose assessment in the city of Aldama, Chihuahua, Mexico**. Journal of Environmental Radioactivity. v. 77, p. 205-219, 2004.

TODINI, E. **Rainfall-runoff modeling, past, present and future**. Journal of Hydrology. Amsterdam, n. 100, p.341-352. 1988.

TRAMBLAY, Y.; OUARDA, T.B.M.J.; ST-HILAIRE, A. & POULIN, J. **Regional estimation of extreme suspended sediment concentrations using watershed characteristics**. J. Hydrol., 380:305-317, 2010.

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

TUCCI, C. E. M. **Modelos hidrológicos**. Ed. da UFRGS/ABRH, Porto Alegre, 668p, 1998.

TZORTZIS, M.; TSERTOS, H.; CHRISTOFIDES, S.; CHRISTODOULIDES, G. **Gamma-ray measurements of naturally occurring radioactive samples from Cyprus characteristic rocks**. Radiation Measurements. v. 37, p. 221-229, 2003.

WALLBRINK, P.J., and A.S. MURRAY. **Fallout of ^7Be in south eastern Australia**. J. Environ. Radioact. 25:213–228, 1994.

WALLBRINK, P.J., and A.S. MURRAY. **Distribution and variability of ^7Be in soils under different surface cover conditions and its potential for describing soil redistribution processes**. Water Resour. Res. 32:467–476, 1996.

WALLBRINK, P.J., B.P. RODDY, and J.M. OLLEY. **A tracer budget quantifying soil redistribution on hillslopes after forest harvesting**. Catena 47:179–201, 2002.

WALLING, D. E. **Use of ^{137}Cs and other fallout radionuclides in soil erosion investigations: Progress, problems and prospects**, In: Using ^{137}Cs measurements to test distributed soil erosion and sediment delivery models, IAEA- TECDOC- 1028, Vienna, p. 39-62, 1998a.

WALLING, D.E., and Q. HE. **Using fallout lead-210 measurements to estimate soil erosion on cultivated land.** Soil Sci. Soc. Am. J. 63(5):1404–1412, 1999b.

WALLING, D.E., Q. HE, and W. BLAKE. **Use of ^7Be and ^{137}Cs measurements to document short- and medium-term rates of waterinduced soil erosion on agricultural land.** Water Resour. Res. 35(12):3865–3874, 1999.

WALLING, D.E., and Q. HE. **Improved models for estimating soil erosion rates from ^{137}Cs measurements.** J. Environ. Qual. 28:611–622, 2002.

WALLING, D.E., and T.A. QUINE. **Calibration of caesium-137 measurements to provide quantitative erosion rate data.** Land Degrad. Rehabil. 2:161–175, 1990.

WALLING, D.E.; COLLINS, A. L.; H.M. SICHINGABULA, H. M. **Using unsupported lead-210 measurements to investigate soil erosion and sediment delivery in a small Zambian catchment.** Geomorphology 52, 193–213, 2003.

WALLING, D. E. e HE, Q. **Models for converting ^{137}Cs measurements to estimates of soil redistribution rates on cultivated and cultivated soils** (including software for model implementation). Report to IAEA, University of Exeter, UK, 1998.

WALLING, D. E. e HE, Q. **Improved models.** J. Environ. Qual., 28, p. 611-6222, 1990.

WALLING, D. E. e HE, Q. **Using ^{137}Cs measurements to test distributed soil erosion and sediment delivery models,** Department of Geography, University of Exeter, Exeter, Ex4 4RJ, UK, Technical Documents in Hydrology No. 60 UNESCO, Paris, p. 243-264, 2002.

WALLING, D. E. e QUINE, T. A. **Use of ^{137}Cs and other fallout radionuclides in soil erosion investigations.** In: Nuclear techniques in soil-plant studies for sustainable agriculture and environmental preservation. IAEA Publication STI/PUB/947, 1995.

WILSON, C.G., G. MATISOFF, and P.J. WHITING. **Short-term erosion rates from a ^7Be inventory balance.** Earth Surf. Processes Landforms 28:967–977, 2003.

WISCHMEIER, W.H., SMITH, D.D. **Predicting rainfall-erosion losses from cropland east of Rocky Mountains.** USDA Agricultural Handbook No. 282, Washington, DC, 1965.

WISCHMEIER, W.H., SMITH, D.D. **Predicting rainfall erosionlosses – a guide to conservation planning.** USDA, Agriculture Handbook 537, Washington, DC, 1978.

WOOLHISER, D. A., R. E. SMITH e D. C. GOODRICH, D. C., **KINEROS, A Kinematic Runoff and Erosion Departament of Agriculture,** Agricultural Research Service, ARS-77, p. 130, 1990.

VIEIRA, M. S.; FERREIRA, J. R.; CASTRO, P. M.; ROCHA, G. A. A. **Aspectos da química da água e do sedimento do reservatório de Ibitinga (São Paulo - Brasil - 21° 45' S e 48° 50' W).** Boletim do Instituto de Pesca, São Paulo, 28 (1): 77 – 91, 2002.

ZABALETA, A.; MARTÍNEZ, M.; URIARTE, J.A. & ANTIGÜEDAD, I. Factors controlling suspended sediment yield during runoff events in small headwater catchments of the Basque Country. Catena, 71:179-190, 2007.

ZAPATA, F. The use of environmental radionuclides as tracers in soil erosion and sedimentation investigations: recent advances and future developments. Soil & Tillage Research 69, 3–13, 2003.