

UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA
CURSO DE MESTRADO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA

**O USO DA TERRA E A RESPOSTA HIDROSEDIMENTOLÓGICA EM
PEQUENAS BACIAS HIDROGRÁFICAS SEMIÁRIDAS**

JOSEILSON OLIVEIRA RODRIGUES

FORTALEZA – CE
2009

Livros Grátis

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

JOSEILSON OLIVEIRA RODRIGUES

**O USO DA TERRA E A RESPOSTA HIDROSEDIMENTOLÓGICA EM
PEQUENAS BACIAS HIDROGRÁFICAS SEMIÁRIDAS**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado em Agronomia do Centro de Ciências Agrárias, da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Agrícola.

Área de concentração: Manejo e Conservação de Bacias Hidrográficas no Semiárido.

Orientador: Prof^ª. Ph.D Eunice Maia de Adrade

R613u Rodrigues, Joseilson Oliveira
O uso da terra e a resposta hidrossedimentológica em pequenas bacias hidrográficas semiáridas / Joseilson Oliveira Rodrigues, 2009.
128 f. ;il. enc.

Orientadora: Profa. Ph.D. Eunice Maia de Andrade
Área de concentração: Manejo de Bacias Hidrográficas
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências Agrárias. Depto. de Engenharia Agrícola, Fortaleza, 2009.

1. Microbacias. 2. Escoamento superficial. 3. Produção de sedimentos.
4. Ação antrópica. I. Andrade, Eunice Maia de (orienta.). II. Universidade Federal do Ceará – Programa de Pós-graduação em Engenharia Agrícola.
III. Título.

CDD 630

**O USO DA TERRA E A RESPOSTA HIDROSEDIMENTOLÓGICA EM
PEQUENAS BACIAS HIDROGRÁFICAS SEMIÁRIDAS**

APROVADA EM: __/__/__

Banca Examinadora:

Prof^a. Eunice Maia de Andrade, Ph.D.
Universidade Federal do Ceará - UFC
(Orientadora)

Prof^o. José Carlos de Araújo, Dr.
Universidade Federal do Ceará
(Examinador)

Maria João Guerreiro, Ph.D.
Universidade Fernando Pessoa - UFP
(Examinadora)

Adunias dos Santos Teixeira, Ph.D.
Universidade Federal do Ceará - UFC
(Examinador)

Aos meus pais, Deoclécio e Raimunda, pelo exemplo de caráter e pelos ensinamentos de simplicidade e dignidade, além de outros, que sempre carregarei e aplicarei como leis fundamentais.

Aos meus irmãos e irmãs, Gracilene, Josafá, Gracineida (Duda), Gracemir e Gracieudo, pelo apoio incondicional durante toda essa árdua jornada.

IN MEMÓRIA: Ao meu querido irmão Josemir Oliveira Rodrigues, que muito cedo partiu, mas deixou felizes recordações que ficarão eternamente vivas em minha mente.

DEDICO

AGRADECIMENTOS

À Professora Eunice Maia de Andrade, pela sua competência, pelo acompanhamento durante praticamente toda minha vida acadêmica, pela amizade e preciosa orientação que foram fundamentais no meu crescimento e amadurecimento profissional.

Ao Departamento de Engenharia Agrícola do Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Ceará, em nome do coordenador de Pós-Graduação, Claudivan Feitosa de Lacerda.

Ao Laboratório de Eletrônica e Mecânica Agrícola (LEMA), em nome do professor Adunias dos Santos Teixeira.

Ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) pela concessão da bolsa de pesquisa, viabilizando dessa forma minha dedicação exclusiva e tornando possível o alcance dessa conquista.

Ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Iguatu-CE (IFCE-Campus de Iguatu), em nome do Diretor Ivam Holanda, pela Logística e acolhimento, sem a qual inviabilizaria este estudo.

Ao Laboratório de Geoprocessamento do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Iguatu, em nome do professor Joaquim Branco.

Agradecimento especial à companheira, conselheira e outrora professora Helba Araújo, hoje amiga e colega de trabalho, a que tenho profundo apreço e admiração. Helba, muito obrigado!

Ao Laboratório de Água, Solo e Tecidos Vegetais do IFCE-Campus de Iguatu, em nome da Doutora Ana Célia Maia Meireles, que permitiu a realização das análises de água empregadas nessa investigação.

Aos professores: Omar Pereira, Adunias dos Santos, Claudivan Feitosa, Raimundo Nonato, Francisco de Souza, Marcus Bezerra, Renato Sílvio, Thales Viana, Fernando Hernandez, pelos ensinamentos e conhecimentos transmitidos.

Ao professor José Carlos Araújo pelos preciosos ensinamentos sobre hidrossedimentologia, fundamentais no desenvolvimento desse trabalho, e por aceitar com prontidão em contribuir com essa dissertação.

Aos dedicados alunos do curso de Tecnologia da Irrigação do IFCE-Campus de Iguatu, colaboradores ativos do projeto: Júlio César, Júnior, Efraim e Eliaquim.

Às meninas do Laboratório de Água e Solos: Janieli, Cleice, Cleiane, Josivânia e Adriana.

Aos Orientados da professora Eunice pelo excelente convívio e amizade: Nílvia Nara, Fredson, Lobato, Fernando, Dirceu, Deodato, Amauri, Eveline, Márcio, Flávio, Lúcio José, Marcos Meireles.

Aos orientados do professor José Carlos Araújo: Mário, Yuri, Pedro, Alexandre Gomes Costa e Alexandre Cunha Costa, pela amizade e troca de experiências científicas.

Aos amigos Luiz Carlos Guerreiro e Junior Borges, Josué Júnior, Anselmo e Hélio.

Aos amigos de residência universitária, em especial a Raul Kenedy.

Aos colegas contemporâneos do Mestrado, Tadeu, Elizângela, Carlos Henrique, Leila, Clênio, Hernandez, Jéferson, Marcos Mesquita, Karine, Sildemberny, Beatriz, Dimas,

Aos funcionários da UFC, principalmente a Firmino pelo desenvolvimento dos equipamentos que contribuíram para encaminhamento da pesquisa.

A todos os trabalhadores brasileiros que, embora na maioria das vezes não consigam vislumbrar dos resultados das pesquisas, mesmo assim, permitem através da manutenção da universidade pública, que pessoas como nós possam ter acesso ao saber, mediante o ensino gratuito.

“O valor de todo o conhecimento está no seu vínculo com as nossas necessidades, aspirações e ações; de outra forma, o conhecimento torna-se um simples lastro de memória, capaz apenas - como um navio que navega com demasiado peso - de diminuir a oscilação da vida quotidiana.”

(Kliutchevski)

RODRIGUES, Joseilson Oliveira, Universidade Federal do Ceará. Julho de 2009. **O uso da terra e a resposta hidrológica em pequenas bacias hidrográficas de regiões semiáridas.** Orientadora: Eunice Maia de Andrade. Examinadores: José Carlos de Araújo, Maria João Guerreiro, Adunias dos Santos Teixeira.

RESUMO

O objetivo central desse trabalho foi avaliar e comparar o comportamento hidrológico e sedimentológico em pequenas bacias rurais no semiárido nordestino, verificando a influência da ação antrópica sobre os recursos solo e água. O estudo desses processos é de suma importância na definição de estratégias para o melhor gerenciamento de pequenas bacias hidrográficas e na definição de planos de sustentabilidade. A área de investigação localiza-se na bacia do Alto Jaguaribe, mais precisamente no município de Iguatu, na região conhecida como Centro Sul do estado do Ceará. A área experimental é composta por quatro microbacias com denominação de B1, B2, B3 e B4 localizadas próximas entre si, foram delimitadas e equipadas com calhas Parshall, sensores de nível de água, pluviógrafos e coletores automáticos de sedimentos visando estudos hidrossedimentológicos em condições de chuva natural. Nessa pesquisa as áreas das bacias em avaliação não excederam 3 hectares, sendo na microbacia B1 aplicado um tratamento (raleamento), que permitiu avaliar a influência da alteração na cobertura vegetal da Caatinga sobre o escoamento superficial, descarga máxima e produção de sedimentos. As demais microbacias experimentais B2, B3 e B4 foram mantidas inalteradas, sem intervenção antrópica, representando condições naturais de pequenas bacias rurais do semiárido do nordeste. Os dados analisados abrangem toda a estação chuvosa de 2009 nas quatro unidades experimentais e alguns eventos nos meses de janeiro, fevereiro e março de 2008 na microbacia B2. Apesar da proximidade entre as unidades de monitoramento, os resultados revelaram grande variabilidade espaço-temporal das respostas hidrossedimentológicas, sendo a umidade anterior do solo a variável de destaque na modificação destas. Os resultados mostraram que a prática de raleamento da Caatinga teve influência na alteração do escoamento superficial e produção de sedimentos, sendo os efeitos maiores sobre os primeiros eventos. A produção acumulada de sedimentos atingiu ao final de 2009 valores de 1,45; 1,39 e 0,12 ton ha⁻¹ para as microbacias B1, B2 e B4, respectivamente. De todas as microbacias investigadas, B3 apresentou os maiores valores de escoamento superficial, e descargas máximas, com coeficiente de escoamento médio em torno de 86%. A unidade experimental B4 mostrou-se com comportamento hidrossedimentológico bastante diferenciado das demais microbacias, sendo nesta encontrado as menores magnitudes de descarga máxima, escoamento superficial e produção de sedimentos, comportamento este associado principalmente às características físicas do solo da microbacia. Os resultados encontrados fornecem elementos importantes no campo hidrossedimentológico em regiões semiáridas, podendo ser empregados para nortear pesquisas futuras em microbacias com escoamento efêmero.

PALAVRAS-CHAVE: microbacias, escoamento superficial, produção de sedimentos, ação antrópica.

RODRIGUES, Joseilson Oliveira, Universidade Federal do Ceará. Julho de 2009. **Land use and the hydrologic response in small watersheds of semiarid regions**. Orientadora: Eunice Maia de Andrade. Examinadores: José Carlos de Araújo, Maria João Guerreiro, Adunias dos Santos Teixeira.

ABSTRACT

This work was carried out to evaluate and to compare the hydrologic and sedimentologic behaviour of small rural catchments in the semiarid Northeast of Brazil, as well as to assess the influence of the anthropogenic action over soil and water resources. The study of these processes is very important for the definition of strategies to a better management of small watersheds and the definition of sustainability plans. The study area is located in the Alto Jaguaribe basin, in the Iguatu County, State of Ceará, Brazil. Four small catchments B1, B2, B3 and B4, neighbor to each other, were delimited and equipped with Parshall flumes, water level sensors, rain-gauges and automatic sediment samplers, aiming hydrossedimentologic studies under natural rainfall conditions. In this research, the areas of studied catchments areas are smaller than three ha. In the B1 part of cover vegetation was cut, making it possible to assess the influence of changes in the vegetation cover over runoff, peak discharge and sediment yield. In the others catchments (B2, B3 and B4), cover vegetation was keeping in undisturbed condition, representing the natural condition in the semiarid region of northeast Brazil. The data analysed comprises the hydrologic year of 2009 on the four experimental unities and some events on the months of January, February and March of 2008 on the small catchment B2. Despite the proximity of the monitored unities, the results show high spatial and temporal variability of the hydrossedimentologic answer, and the antecedent soil moisture as the main variable responsible for such modifications. It was observed that lowering the density of the Caatinga vegetation influenced runoff and sediment yield, with greater effects over the first events. Accumulated sediment yield reached values of 1.45, 1.39 and 0.12 ton.ha⁻¹ for the micro-catchments B1, B2 e B4, respectively, at the end of the year 2009. Among all investigated catchments, B3 presented the highest values of runoff and peak discharges, with runoff coefficient average around 28%. The B4 experimental unit had a hydrossedimentologic behaviour very different from the other catchments, showing the lowest values of peak discharge, runoff and sediment yield, and this behaviour can be explained to the soil characteristics. The results presented in this study contribute with important information for the hydrossedimentologic study of semiarid regions, and can be used to guide further research in small catchments with ephemeral regime.

KEY-WORDS: micro-catchments, surface runoff, sediment yield, anthropogenic action.

LISTA DE TABELAS

TABELA 1	Características morfométricas das microbacias experimentais: B1, B2, B3 e B4.....	34
TABELA 2	Coordenadas geográficas dos equipamentos instalados nas microbacias	35
TABELA 3	Dados de análise físico-química do solo da microbacia B1	37
TABELA 4	Dados de análise físico-química do solo da micro-bacia B2.....	37
TABELA 5	Dados de análise físico-química do solo da microbacia B3	38
TABELA 6	Dados de análise físico-química do solo da microbacia B4	38
TABELA 7	Porcentagem dos componentes da cobertura vegetal encontrados nas microbacias experimentais	42
TABELA 8	Equações de regressão para conversão de frequência em altura de coluna de água na calha Parshall	56
TABELA 9	Condutividade hidráulica saturada para as unidades experimentais B1, B2, B3 e B4	62
TABELA 10	Densidade do solo (D_s), micro (M_f) e macroporosidade (M_A) e porosidade total (P_T), dos solos das microbacias avaliadas.....	63
TABELA 11	Características hidrológicas da microbacia B1 para o ano de 2009: precipitação (PPt), duração da precipitação, vazão de pico ($Q_{m\acute{a}x}$), lâmina escoada (LE), coeficiente de runoff (C), volume escoado (V) e intensidade máxima para intervalos de 30 minutos (I_{30}).....	66
TABELA 12	Características hidrológicas da microbacia B2 para o ano de 2008: precipitação, duração da precipitação (PPt), vazão de pico ($Q_{m\acute{a}x}$), lâmina escoada (LE), coeficiente de runoff (C), volume escoado (V) e intensidade máxima para intervalos de 30 minutos (I_{30}).....	71
TABELA 13	Características hidrológicas da microbacia B2 para o ano de 2009: precipitação (PPt), duração da precipitação, vazão de pico ($Q_{m\acute{a}x}$), lâmina escoada (LE), coeficiente de runoff (C), volume escoado (V) e intensidade máxima para intervalos de 30 minutos (I_{30}).....	78
TABELA 14	Características hidrológicas da microbacia B3 para o ano de 2009: precipitação (PPt), duração da precipitação, vazão de pico ($Q_{m\acute{a}x}$), lâmina escoada (LE), coeficiente de runoff (C), volume escoado (V) e intensidade máxima para intervalos de 30 minutos (I_{30}).....	82

TABELA 15	Características hidrológicas para microbacia B4 para o ano de 2009: precipitação, duração da precipitação, vazão de pico, lâmina escoada (LE), coeficiente de runoff (C), volume escoado e intensidade máxima para intervalos de 30 minutos (I_{30}).....	87
TABELA 16	Dados de precipitação pluviométrica para a estação chuvosa de 2009 para as unidade experimentais B1, B2, B3 e B4.....	89
TABELA 17	Desvios percentuais e valores medidos e estimados da produção de sedimentos nas microbacias B1, B2 e B3 na estação chuvosa de 2009.....	117

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1	Mecanismos de escoamento em secção de uma microbacia: 1) escoamento hortoniano; 2) escoamento pelo lençol freático (escoamento de base); 3) escoamento subsuperficial; 4) escoamento superficial por saturação subsuperficial	23
FIGURA 2 -	Fluxograma dos principais fatores ativos e passivos que afetam a erosão na superfície do solo.....	26
FIGURA 3	Localização das microbacias experimentais no Estado do Ceará.....	33
FIGURA 4	[a] Detalhe da estrutura do solo no período seco; [b] Condições de encharcamento dos solos em pontos de acesso às microbacias no período chuvoso.....	36
FIGURA 5	Série histórica anual de precipitação pluviométrica no posto Iguatu no município de Iguatu – CE.....	40
FIGURA 6	Série histórica mensal de precipitação pluviométrica no posto de Iguatu – CE. As barras verticais representam a amplitude mensal para a série histórica entre 1973 e 2008.....	40
FIGURA 7	Detalhe da cobertura morta vegetal rasteira da espécie <i>Selaginella Convoluta</i> sobre a microbacia experimental B4.....	42
FIGURA 8	[a] Detalhe da cobertura morta e [b] Parte da microbacia B1 coberta por espécie forrageira herbácea	43
FIGURA 9	Visão parcial das condições de vegetação da microbacia experimental B1, na estação chuvosa antes [a] e depois [b] do raleamento.....	45
FIGURA 10	Visão parcial das condições de vegetação da microbacia experimental B1, na estação seca antes [a] depois [b] do raleamento	45
FIGURA 11	Equipamento de medição de condutividade hidráulica saturada (Amoozometer)	47
FIGURA 12	Diagrama esquemático dos componentes da Amoozometer [a] e corte transversal de equipamento com ilustração para dimensionamento [b].....	49
FIGURA 13	Detalhe do Pluviógrafo de báscula [a] e Pluviômetros do tipo Ville de Paris [b]	51

FIGURA 14	Confecção das calhas Parshall em fibra de vidro [a] e instalação em campo com estrutura de alvenaria [b]	52
FIGURA 15	Detalhe da calha Parshall instalada em campo (maio 2008), [a] visão geral, [b] em funcionamento.....	53
FIGURA 16	Sensor capacitivo para monitoramento do nível de água na calha Parshall....	54
FIGURA 17	Equipamento empregado para calibração do sensor de nível de água no LEMA.....	55
FIGURA 18	Modelo de gráfico de calibração empregado nas calhas Parshall das microbacias.....	56
FIGURA 19	Esquema de aquisição de dados na estação hidro-meteorológica automática elaborada no LEMA	57
FIGURA 20	Torre de coleta de sedimentos confeccionados no LEMA [a], disposição dos recipientes no equipamento [b]	58
FIGURA 21	Umidade do solo nas microbacias B1, B2, B3 e B4 para o ano de 2009	64
FIGURA 22	Microbacia hidrográfica B1 após remoção parcial da vegetação pelo tratamento raleamento (novembro 2008)	68
FIGURA 23	Relação entre pico de descarga por evento e a correspondente precipitação pluviométrica no ano de 2009 para a microbacia B1	69
FIGURA 24	Relação entre pico de descarga por evento e a correspondente intensidade máxima em 30 minutos no ano de 2009 para a microbacia B1....	69
FIGURA 25	Distribuição da precipitação pluviométrica e dos eventos geradores de escoamento superficial na microbacia B2 para o ano de 2008.....	70
FIGURA 26	Precipitação, intensidade e descarga para o evento do dia 12 março de 2008, na microbacia B2.....	74
FIGURA 27	Distribuição da precipitação pluviométrica e dos eventos geradores de escoamento de runoff na microbacia B2 para o ano de 2009.....	76
FIGURA 28	Distribuição da precipitação pluviométrica e dos eventos geradores de escoamento de runoff na microbacia B3 para o ano de 2009.....	80
FIGURA 29	Distribuição da precipitação pluviométrica e dos eventos geradores de escoamento de runoff na microbacia B4 para o ano de 2009.....	86
FIGURA 30	Relação em os valores de precipitação pluviométrica medidos nas microbacias B1/B2 e B4 no ano de 2009	90
FIGURA 31	Relação em os valores de precipitação pluviométrica medidos nas microbacias B4 e B3 no ano de 2009.....	90

FIGURA 32	Duração da precipitação (Dp), do Deflúvio (Dd) e relação entre as durações para os eventos da estação chuvosa de 2009, na microbacia B1	91
FIGURA 33	Duração da precipitação (Dp), do Deflúvio (Dd) e relação entre as durações para os eventos da estação chuvosa de 2009, na microbacia B2	93
FIGURA 34	Duração da precipitação (Dp), do Deflúvio (Dd) e relação entre as durações para os eventos da estação chuvosa de 2009, na microbacia B3	93
FIGURA 35	Duração da precipitação (Dp), do Deflúvio (Dd) e relação entre as durações para os eventos da estação chuvosa de 2009, na microbacia B4	94
FIGURA 36	Lâmina escoada sobre o curso principal da unidade experimental B4 (abril 2009)	94
FIGURA 37	Comparativo hidrológico sobre os parâmetros: lâmina escoada e volume escoado para as microbacias B1 e B2, para a estação chuvosa de 2009	96
FIGURA 38	Agregados em forma de blocos encontrados nos solos da microbacia experimental B3 (estação seca).....	99
FIGURA 39	Hidrogramas de B1 e B2, e características da precipitação para o evento do dia 30/01/09	101
FIGURA 40	Hidrogramas de B1 e B2 e características da precipitação para o evento do dia 18/02/09	103
FIGURA 41	Hidrogramas das microbacias, B1, B2, B3 e B4 e características da precipitação para os eventos dos dias 24 e 25 de abril de 2009	105
FIGURA 42	Distribuição da produção de sólidos totais para os eventos geradores de escoamento superficial nas quatro microbacias.....	107
FIGURA 43	Depósito de sedimentos no canal principal provocado por eventos anteriores na microbacia experimental B1	108
FIGURA 44	Zonas desprotegidas nas partes altas da microbacia experimental B2.....	109
FIGURA 45	Fluxo de água (a) e depósito de sedimentos próximo à calha Parshall da microbacia B3 (b).....	110
FIGURA 46	Produção de sedimentos por hectare (SY) e valores de erosividade (EI ₃₀) por evento, nas microbacias B1, B2 e B4 para a estação chuvosa de 2009 ..	112
FIGURA 47	Curva-chave para microbacias experimentais: B1, B2 e B4 na estação chuvosa de 2009.....	115

LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS

B1, B2, B3 e B4 – Microbacias experimentais avaliadas
DENA - Departamento de Engenharia Agrícola
EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
FUNCEME – Fundação Cearense de Meteorologia
GPS – Sistema Posicionamento de Global
IFCE - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará
IPECE - Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Ceará
LEMA - Laboratório de Eletrônica e Mecânica Agrícola
MNT – Modelo Numérico do Terreno
PCD – Plataforma de coleta de dados
SUDEC - Superintendência do Desenvolvimento do Estado do Ceará
UFC – Universidade Federal do Ceará
ZCIT - Zona de Convergência Intertropical
A – Coeficiente da equação de Glover
C – Coeficiente de escoamento superficial
D – Deflúvio da bacia
d – Desvio percentual entre a produção de sedimentos medidas e estimadas
Db – Declividade das microbacias
D_s - Densidade do solo
EI₃₀ – Erosividade das chuvas
h – Altura da coluna de água do sensor de nível d'água
H - Distância da parte inferior do orifício feito no ao nível de água
I₃₀ - Intensidade máxima de precipitação pluviométrica em trinta minutos
I₅ - Intensidade máxima de precipitação pluviométrica em cinco minutos
kC – Coeficiente de compacidade
K_{sat} – Condutividade hidráulica saturada
Lb – Comprimento das microbacias
Lcp – Comprimento do curso principal
LE – Lâmina escoada
Lt – Comprimento do talvegue
M.O – Matéria Orgânica

M_A – Macroporosidade do solo
 M_I – Microporosidade do solo
 m_s – massa do solo seco
nda – Dado não disponível
PPT – Precipitação Pluviométrica
 PPt_{acum} – Precipitação Pluviométrica acumulada
 P_T – Porosidade total
Q – Fluxo de água no estado permanente
 Q_{max} – Descarga máxima
r - Raio do orifício conduzido com trado
 R_f – Fator de forma das microbaicas
s - Representa a distância da camada impermeável do solo à parte inferior do orifício
SY – Produção de sedimentos medida
 SY_{Acum} – Produção de sedimentos acumulada
 SY_{est} – Produção de sedimentos estimada
 T_c – Tempo de concentração das microbaicas
V – Volume escoado
 V_s – volume do solo seco
W – Largura de estrangulamento da calha

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	19
1.1	Caracterização do problema	19
1.2	Objetivos	20
2	REVISÃO DE LITERATURA	22
2.1	Processos chuva deflúvio	22
2.2	Aspectos gerais sobre erosão	25
2.2.1	Processos erosivos	25
2.2.2	Erosão hídrica – Formação e consequências	26
2.2.3	Produção de sedimentos	27
2.3	Comparativo hidrológico	28
2.4	Cobertura vegetal versus respostas hidrológicas	30
3	MATERIAL E MÉTODOS	32
3.1	Características da área de estudo	32
3.1.1	Localização e descrição	32
3.1.2	Características do solo	35
3.1.3	Clima	38
3.1.4	Vegetação	41
3.2	Delimitação das microbacias experimentais	43
3.3	Unidades experimentais	44
3.3.1	Microbacias hidrográficas	44
3.3.2	Monitoramento das microbacias	46
3.4	Ensaio para avaliação da infiltração de água no solo	47
3.4.1	Determinação da condutividade hidráulica saturada do solo	47
3.4.2	Determinação da macro e microporosidade do solo	49
3.4.3	Determinação da umidade do solo	50
3.5	Processo Chuva-Deflúvio	50
3.5.1	Pluviômetros e pluviógrafos	50
3.5.2	Calha Parshall	52
3.5.3	Sensor de nível de água (Linígrafo)	54
3.5.4	Sensores de Umidade relativa do ar, temperatura do solo e ar	56
3.6	Produção de sedimentos	58

3.7	Curvas-chave e Erosividade	59
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	61
4.1	Características de infiltração e umidade do solo nas microbacias	61
4.2	Processos Chuva de flúvio nas microbacias monitoradas	64
4.2.1	Respostas hidrológicas em B1	64
4.2.2	Respostas hidrológicas em B2	70
4.2.3	Respostas hidrológicas em B3	79
4.2.4	Respostas hidrológicas em B4	84
4.3	Comparativo hidrológico e análise de processos	88
4.3.1	Características do escoamento das microbacias.....	91
4.3.2	Comparativo dos eventos chuva-deflúvio sobre as microbacias	95
4.4	Análises de Hidrogramas	99
4.5	Produção de sedimentos	105
4.5.1	Produção de sólidos nas microbacias	105
4.5.2	Produção de sedimentos por unidade de área nas microbacias.....	111
4.5.3	Curvas chaves vazão máxima versus produção de sedimentos	114
5	CONCLUSÕES	117
6	RECOMENDAÇÕES	119
	REFERÊNCIAS	121

1 INTRODUÇÃO

1.1 Caracterização do problema

As regiões semiáridas cobrem aproximadamente um terço da superfície da terra e sobre elas vivem aproximadamente 20% da população mundial. Estas regiões são zonas de alta fragilidade com um regime de precipitação pluviométrica de alta variabilidade espacial e temporal. A região Nordeste em que o clima semiárido predomina é uma ambiente de contrastes, onde se verifica lado a lado a exploração intensiva dos recursos naturais por centros comerciais de agricultura e por pequenos produtores como forma de garantir a subsistência. A exploração de recursos limitados como solo e água de forma insustentável nessa região pela ação antrópica, resulta em sua escassez, com sérios reflexos negativos.

A variabilidade do regime pluvial dessas regiões associada à intervenção do homem no uso do solo e da água podem alterar os mesmos, conduzindo a uma nova capacidade de suporte desses recursos. O novo ponto de equilíbrio do sistema poderá resultar em uma redução da capacidade de produção de água em escala de sub-bacias. Concomitante a esse problema, a condução imprópria do manejo de pequenas bacias tem proporcionado sérios problemas de cunho ambiental, como a erosão em áreas agrícolas, tendo como consequência o empobrecimento dos solos agrícolas, o assoreamento e a redução da capacidade hidráulica de reservatórios a jusante.

Além dos problemas mencionados, em função das pressões demográficas pela demanda crescente de produtos agrícolas e florestais, é comum nessas regiões a prática de desmatamento, como forma de garantir áreas úteis para produção agrícola e pecuária. O desmatamento indiscriminado para formação de novas lavouras, aliadas à retirada de madeira para benfeitorias (construção, lenha, carvão, etc) e ainda devido às queimadas sucessivas com manejo inadequado do solo, tem contribuído, juntamente com secas prolongadas, para comprometer o frágil equilíbrio da Caatinga. A junção dessas ações vem, em muitos casos, resultar em modificações permanentes dos processos hidrossedimentológicos. Dessa maneira o manejo e o gerenciamento incorretos da Caatinga têm contribuído para aceleração dos processos erosivos, causando grandes prejuízos de natureza financeira e principalmente ambiental.

Grandes esforços têm sido conduzidos sobre o entendimento do comportamento e/ou alterações dos processos hidrosedimentológicos em pequenas bacias, dada a sua relevante importância. O essencial papel da água por si só, sobre o funcionamento e gerenciamento do Bioma Caatinga, justificam investigações sobre o comportamento hidrológico, uma vez que as informações geradas podem ser aplicadas a outros sistemas com características similares. Alterações em microbacias são passíveis de ocorrência em condições naturais, porém o efeito, por exemplo, de modificações sobre a cobertura vegetal ou uso da terra podem culminar na degradação, com um alto potencial de alterar a infiltração, o balanço de água superficial e subterrâneo, o assoreamento, assim como desbalancear a concentração de solutos.

Apesar do desenvolvimento de alguns estudos conduzidos no semiárido sobre alterações de microbacias, mais pesquisas devem ser implementadas no sentido de gerar informações em escala de microbacias de escoamento efêmero, em regiões semiáridas, principalmente investigando a influência do homem na alteração dos processos naturais (erosão, escoamento superficial, evaporação, infiltração, temperatura, etc.). Os desafios nesse tipo de estudo têm sido principalmente devido à dificuldade de um monitoramento contínuo, de forma a gerar informações qualitativas e quantitativas consistentes desses processos.

1.2 Objetivos

O objetivo geral dessa pesquisa foi avaliar e comparar o comportamento hidrológico e sedimentológico em pequenas bacias rurais no semiárido do Nordeste, verificando a influência da ação antrópica sobre os recursos solo e água.

Objetivos específicos:

Caracterização, monitoramento e avaliação de processos de escoamento superficial em microbacias hidrográficas em região semi-árida;

Quantificar a produção de sedimentos em escala de pequenas bacias sob condições de chuva natural;

Avaliar o efeito da ação antrópica sobre as perdas de solo em pequenas bacias rurais;

Gerar informações de chuva de flúvio e produção de sedimentos para microbacias de escoamento efêmero, servindo de base para estudos posteriores.

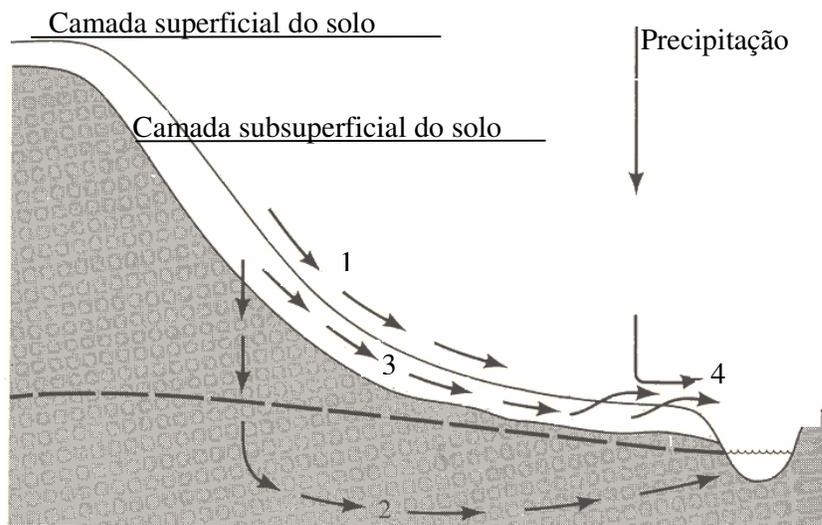
2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Processos chuva deflúvio

Os processos chuva deflúvio em uma microbacia hidrográfica são reconhecidamente complexos, envolvem grande parte das variáveis e parâmetros associados ao ciclo hidrológico, sendo seu entendimento e sua representatividade pelo emprego do cálculo um dos pontos chave da hidrologia. O deflúvio superficial corresponde ao segmento do ciclo hidrológico relacionado ao deslocamento da água sobre a superfície do solo. O conhecimento deste segmento é de fundamental importância em projetos e obras de engenharia e na identificação das disponibilidades e potencialidades hídricas de uma bacia hidrográfica. (PRUSKI; BRANDÃO; SILVA, 2004; ALENCAR; SILVA; OLIVEIRA, 2006).

Muitos processos estão envolvidos no escoamento superficial ou runoff, tendo cada um deles deferentes resposta a um dado evento de precipitação. Entre os processos que interferem no escoamento superficial de uma microbacia encontram-se: precipitação, interceptação, evapotranspiração, infiltração, retenção e armazenamento superficial. (HAAN; BARFIELD; HAYES, 1993). Embora todos estes processos sejam importantes na hidrologia, os autores supra citados consideram que a precipitação, a infiltração, o armazenamento superficia e o fluxo de água sobre o solo, são de maiores relevância.

Os mecanismos principais de escoamento que podem acontecer em microbacias são: escoamento superficial hortoniano, escoamento subsuperficial, escoamento de água subterrânea (ou escoamento de base), escoamento superficial por saturação subsuperficial e precipitação direta no canal. (CHOW; MAIDMENT; MAYS, 1988). A importância relativa de cada processo em uma dada área está principalmente condicionada ao clima, à geologia, à topografia, às características do solo, à vegetação e ao uso da terra. (DUNNE; LEOPOLD, 1978). Estes mecanismos estão representados na Figura 1.



Fonte: DUNNE; LEOPOLD, 1978.

Figura 1 – Mecanismos de escoamento em seção de uma microbacia: 1) escoamento hortoniano; 2) escoamento pelo lençol freático (escoamento de base); 3) escoamento subsuperficial; 4) escoamento superficial por saturação subsuperficial.

O escoamento hortoniano ocorre quando a intensidade de precipitação excede a capacidade de infiltração do solo, ou seja, quando a intensidade da precipitação pluviométrica (i) for superior à taxa de infiltração instantânea (f), ocorre escoamento superficial hortoniano a uma taxa ($i-f$). (CHOW; MAIDMENT; MAYS, 1988). Este tipo de escoamento tem se mostrado predominante em algumas regiões de clima semiárido (CANTÓN et al., 2001; COSTA 2008), sendo a fonte principal na geração de picos de descarga em microbacias, especialmente em área com estrutura de solos compactados ou desprovidos de cobertura vegetal. (KIMOTO et al., 2002; GARFUR et al., 2003; THOMAZ, 2009).

Segundo Chow, Maidment e Mays (1988), no escoamento superficial por saturação subsuperficial, diferente do escoamento hortoniano o solo satura-se inicialmente nas camadas inferiores, atinge as camadas superiores e escoar, quer seja subsuperficialmente ou superficialmente. Tipicamente este tipo de escoamento pode ocorrer em condições de solos rasos comumente encontrados no nordeste brasileiro, em solos com camadas superficiais com impedimento ou durante eventos de longa duração, como consequência de uma série de eventos consecutivos, sendo os primeiros eventos responsáveis pela saturação do solo e os seguintes promovem o escoamento sobre a superfície do solo. (ASCE, 1996).

O escoamento subsuperficial ocorre quando a água é percolada e se move em camadas subsuperficiais até atingir a superfície em algum ponto do declive, daí então escoar superficialmente até atingir o canal. Normalmente a velocidade deste fluxo é baixa e a quantidade do fluxo não é tão expressiva quanto o fluxo hortoniano, exceto em casos em que a condutividade hidráulica do solo é muito alta. (CHOW; MAIDMENT; MAYS, 1988).

A água que percola pode atingir o lençol freático e ser drenada até o curso da bacia (Figura 1). Este tipo de escoamento que ocorre abaixo da linha do lençol, cuja ocorrência acontece nas camadas mais profundas do solo ou em rochas estratificadas, recebe a denominação de escoamento de água subterrânea ou escoamento de base. (CHOW; MAIDMENT; MAYS, 1988). Esse padrão de escoamento é responsável por manter os cursos de água perenes, sendo que em regiões semiáridas tropicais o mesmo se presente, em sua maior parte apenas se verifica durante a estação chuvosa em cursos de água de maior porte.

Devido a importância do processo chuva-deflúvio em microbacias, muitos estudos têm sido conduzidos em diversas regiões de mundo em diferentes escalas, verificando alterações desse processo em resposta ao uso da terra.

Bartley et al. (2006) analisaram em escala de microbacias o escoamento superficial em regiões semiáridas na Austrália. Estes autores verificaram uma grande variabilidade espacial e temporal do coeficiente de escoamento superficial e constataram também que, mesmo em áreas com cobertura vegetal e declividade semelhantes, dependendo do arranjo da cobertura vegetal, essas podem apresentar respostas hidrológicas diferentes. Estes autores encontraram coeficiente de escoamento anual entre 8 e 14%, em microbacias com condições similares de vegetação. Em outra, considerada degradada, o valor encontrado variou entre 45 e 71%.

Kang et al. (2001) pesquisaram em escala de lotes e microbacias na China o efeito do uso da terra sobre processos chuva deflúvio, bem como diferenças nas respostas de cada microbacia a diferentes tratamentos aplicados. Neste estudo o deflúvio foi significativamente reduzido em áreas com cobertura vegetal, em comparação a ambientes com solo exposto, sendo o coeficiente variando de 1,4 a 62,3%.

Cantón et al. (2006) mostraram, em estudo em regiões semiáridas no sudeste da Espanha, a complexidade do processo chuva deflúvio em pequena escala. Estes autores alertam que mesmo em áreas relativamente pequenas, além das condições de cobertura vegetal, pode haver uma grande variação nas condições de solo que, aliadas às características climáticas e tipo de escoamento, dificultam a explicação dos processos envolvidos e transferência de resultados.

2.2 Aspectos gerais sobre erosão

2.2.1 Processos erosivos

A degradação dos recursos naturais, principalmente do solo e da água, vem crescendo de forma alarmante, atingindo níveis críticos que se refletem na deterioração do meio ambiente, no assoreamento dos cursos e dos espelhos d'água, tendo como principal causa dessa degradação a erosão hídrica. (SANTOS; SILVA; SRINIVASAN, 2007; SILVA; SANTOS, 2008).

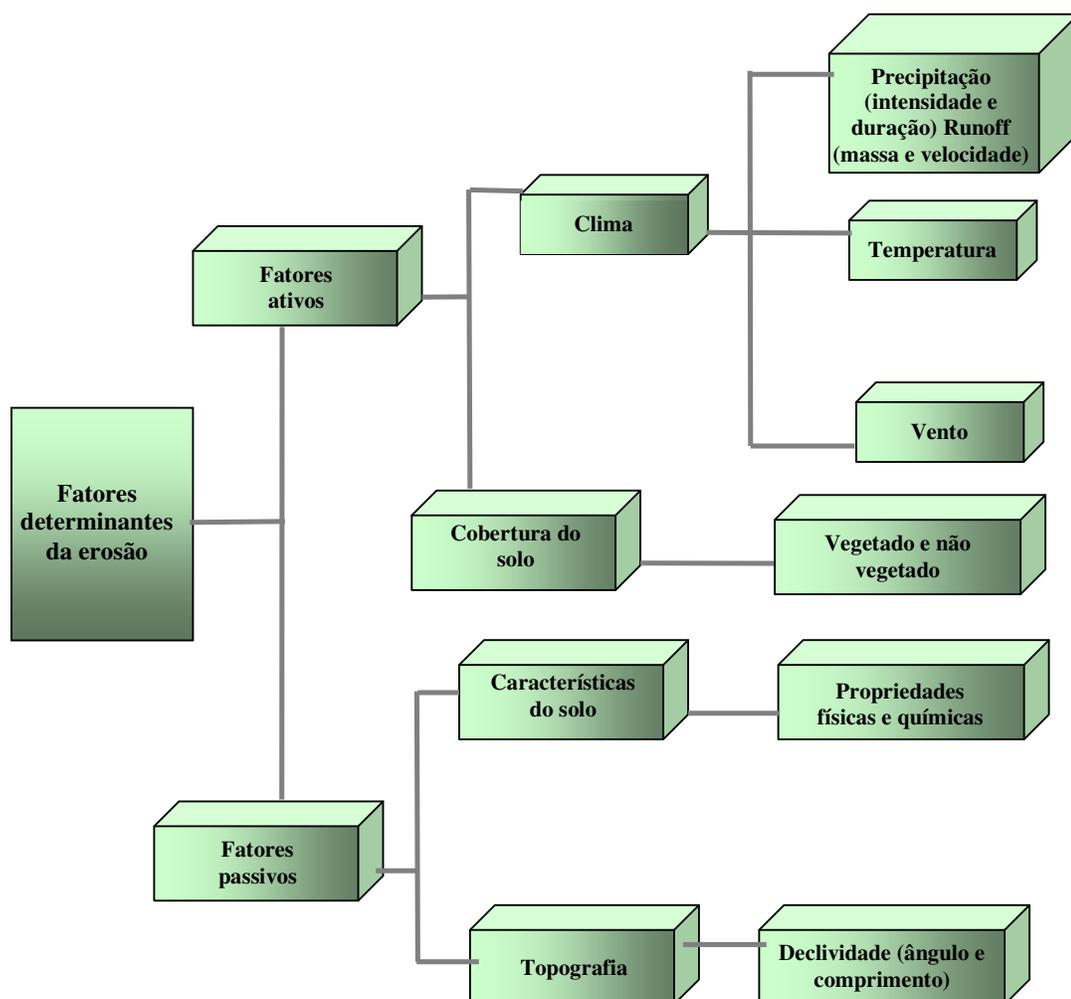
Em condições naturais as paisagens são formadas por um longo processo de intemperismos das rochas, em um mecanismo natural conhecido como erosão geológica. A erosão é um processo composto pela desagregação, pelo transporte e pela deposição das partículas do solo, sendo o vento e a água os principais agentes. (BROOKS et al., 1991).

Em condições naturais, a perda de solo é um processo lento e tolerável, porém o que se tem observado é uma crescente aceleração dos processos erosivos promovido pela intervenção antrópica, em que as perdas de solo estão em sua maioria acima das quantidades admissíveis, conforme constatações de diversos pesquisadores. (GARFUN et al., 2003; THOMAZ, 2009). Este processo é conhecido como erosão acelerada. (LAL, 1994). Dentre os problemas relacionados à erosão estão a degradação de áreas agrícolas e assoreamento de rios e reservatórios, em casos extremos pode resultar na contaminação de mananciais, como consequência do transporte de fertilizantes e agroquímicos contidos nas partículas do solo (MACHADO, 2002).

Segundo Santos et al. (2001), o transporte de sedimentos constitui parte do processo erosivo que envolve a remoção, transporte e deposição de material que faz parte da formação das paisagens, originando as formas geomorfológicas. Já a produção de sedimentos trata de parte do material que é erodido, que se formou do processo de erosão, que são transportados de um ponto qualquer de monitoramento, até o exutório da bacia. (DE VENTE et al., 2008). Estimativa da produção de sedimentos é primordial para uma compreensão mais profunda da variabilidade natural e intervenções antrópicas sobre uma bacia.

2.2.2 Erosão hídrica – Formação e consequências

O processo de erosão hídrica se inicia quando as partículas do solo são desagregadas da estrutura do solo pelo impacto da energia cinética contida nas gotas de chuva, ou pela energia contida na massa de água em movimento, essas por sua vez são transportadas pela massa de água ou pela ação dos ventos. (BROOKS et al., 1991). Na verdade o processo erosivo é de grande complexidade, e a desagregação das partículas pelo impacto das gotas representa um agente primário da erosão hídrica, que ocorre principalmente em condições de vegetação esparsa comumente verificado no bioma Caatinga sobre influência da ação antrópica. A erosão envolve a combinação de uma série de fatores atuando simultaneamente conforme fluxograma abaixo (Figura 2).



Fonte: adaptado de JONHSON, 1961 apud BROOKS et al., 1991.

Figura 2 – Fluxograma dos principais fatores ativos e passivos que afetam a erosão na superfície do solo.

O material transportado pela enxurrada, oriundo da desagregação do solo devido à energia cinética das gotas das chuvas e da força de cisalhamento do escoamento, será depositado nas partes mais baixas da bacia hidrográfica ou, dependendo de sua granulometria, se acumulará nos macroporos, reduzindo a capacidade de infiltração do solo. Um dos fatores de maior importância na redução da energia cinética das gotas e, por conseguinte a erosão hídrica é a cobertura vegetal, cuja eliminação torna o solo exposto à ação direta da chuva, aumentando o escoamento superficial e perdas de água e solo, o que resulta em sérios danos das propriedades físicas e químicas do solo. (ALBUQUERQUE; LOMBARDINE NETO; SRINIVASAN, 2001; ALBUQUERQUE et al., 2002). Segundo Ghidin et al. (2006), a estrutura do solo (tipo, tamanho e grau de desenvolvimento) apresenta-se também como um parâmetro de forte expressão sobre a tendência de erosão laminar, sendo essa, a causa de grandes problemas tanto em escala local como regional com sérios reflexos ambientais. Silva et al. (2005) reiteram que além da estrutura e da granulometria, o manejo do solo desempenha importante participação na retenção de água no solo com intervenção sobre as respostas hidrológicas. Já Lado e Ben-Hur (2004) sugerem que além dos parâmetros acima, o tipo de argila presente no solo apresenta também um importante efeito sobre a estabilidade dos agregados e do selamento da camada superficial, alterando as perdas de solo.

2.2.3 Produção de sedimentos

A produção de sedimentos é a resultante do processo de erosão ao longo de uma bacia. A quantificação dos sedimentos gerados em uma bacia é fundamental no desenvolvimento e na adoção de técnicas eficazes de controle dos processos erosivos tornando possível determinar o grau de deterioração do solo, do assoreamento e da contaminação dos corpos hídricos. (SILVA, 2006).

A produção de sedimentos em microbacias de escoamento efêmero tem sido pouco documentada na literatura brasileira, e as maiores contribuições são relatadas em zonas úmidas e de rios perenes. A escassez de estudos em regiões semiáridas está diretamente associada à dificuldade de monitoramento dos eventos que ocorrem nessa região, pois os mesmos se caracterizam por um pequeno número de ocorrência em um curto período de tempo. (CEBALLOS; SCHNABEL, 1998). Sabe-se que a produção de sedimentos ocorre em condições naturais, em taxas toleráveis, porém o agravamento devido a intervenção do

homem tem resultado em elevadas produções de sedimentos. (KANG et al., 2001; BRARTLEY et al., 2006). Portanto, a quantificação destes impactos torna-se uma ferramenta importante para um melhor gerenciamento desse ecossistema.

Garfur et al. (2003) estudando pequenas bacias rurais cultivadas, constataram a forte influência da intervenção antrópica sobre a produção de sedimentos em Bangladesh. As microbacias estudadas foram propositalmente alteradas, com tratamento de corte e queima da vegetação, onde se constatou profundas mudanças no comportamento hidrológico e na produção de sedimentos nas unidades monitoradas.

Srinivasan, Santos e Galvão (2003) apontam sobre as dificuldades de uma quantificação precisa dos processos erosivos e de escoamento superficial em pequena escala, devido sua complexidade, porém apontam sobre uma clara diferenciação destes processos quando se avalia bacias desmatadas e protegidas por vegetação natural.

Cantón et al. (2003) avaliando respostas hidrológicas e erosão hídrica em condições de chuva natural em regiões semiáridas na Espanha, sugerem que existe a possibilidade de alta produção de sedimentos para ecossistemas com ausência de intervenção antrópica. Estes autores mostram a complexidade da variação na produção de sedimentos, seja devido à característica de solo e vegetação ou das próprias características do evento em proporcionar energia para geração de runoff e erosão, dificultando dessa forma a transferência de resultados.

2.3 Comparativo hidrológico

Devido à carência de informações hidrológicas, concernente a dificuldade de monitoramento e escassez de dados, tem-se notado uma procura constante de informações de regiões hidrológicamente homogêneas como forma de entendimento das respostas hidrológicas em bacias sem medição. Informações hidrológicas sobre condições climáticas, edáficas e de vegetação em regiões específicas, são de grande importância, pois podem ser transferidas para outras regiões com condições similares ou para calibração de modelos hidrológicos. De fato, em estudos hidrológicos as relações matemáticas são desenvolvidas para que informações de bacias com equipamentos de medição e séries longas de dados possam ser aplicadas para bacias com similaridade hidrológica sem medição. Para isso, faz-se necessário a aquisição de dados em microbacias monitoradas, para que esses sejam

empregados em bacias não monitoradas, porém de características climáticas, hidrológicas e geomorfológicas similares. (PONCE, 1989).

Apesar de relevante, a prática de comparativo hidrológico tem-se mostrado com falhas em algumas situações, principalmente quando conduzida em ecossistemas com características climáticas diferentes, não levando em consideração as limitações devido às especificidades de cada ambiente. (ARAÚJO; PIEDRA, 2009). Os estudos hidrológicos locais constituem parte importante no que se refere a adaptação do conhecimento geral dos processos hidrológicos a condições de aplicações específicas, porém devido existência de uma grande quantidade de variáveis que influenciam de forma direta ou indireta nas respostas hidrológicas locais, torna-se impossível um modelo aplicado a todas as situações. (FALKENMARK; CHAPMAN, 1993).

Já se sabe que pesquisas conduzidas em bacias tropicais, especialmente em regiões semiáridas são reduzidas, quando comparadas àquelas em bacias com clima úmido (FARIAS, 2008; MUGABE; HODNETT; SENZANJE, 2007), e a lacuna no conhecimento de estudos hidrológicos torna-se ainda maior quando analisados em microbacias de escoamento efêmero. (MELLO; LIMA; SILVA, 2003). Dessa forma, o conhecimento gerado em unidades experimentais que possam ser usados e comparados em regiões com similaridade de respostas e processos hidrológicos aos do presente estudo, são de extrema relevância.

Mugabe, Hodnett e Senzanje (2007) compararam as respostas hidrológicas de duas microbacias hidrográficas em clima semiárido no Sul da África. Os autores comentam que, apesar da similaridade climática entre ambas, as respostas hidrológicas são bastante variáveis dependendo das características da precipitação pluviométrica. Neste estudo as respostas hidrológicas foram expressivamente afetadas pelas condições de umidade antecedente.

Bartley et al. (2006) avaliando e comparando processos hidrológicos em três diferentes áreas em clima semiárido na Austrália demonstraram a alta participação da cobertura vegetal no incremento de escoamento superficial. Os mesmos autores discutem que não somente a condições de cobertura vegetal como também o arranjo dessa cobertura foram decisivos na modificação das respostas hidrológicas.

2.4 Cobertura vegetal versus respostas hidrológicas

A cobertura vegetal das bacias hidrográficas sofre várias modificações quer sejam naturais ou artificiais, e essa dinâmica produz as mais variadas alterações no meio ambiente, bem como nas respostas hidrológicas. O escoamento superficial é um dos primeiros processos a ser alterado quando a cobertura vegetal da bacia é modificada e, conseqüentemente, a produção de sedimentos e nutrientes (GARCIA-RUIZ et al., 2008; GARFUR et al., 2003; GERMER et al., 2009).

Além da influência sobre as repostas hidrossedimentológicas, a vegetação tem um papel fundamental no balanço de energia e no fluxo de volumes de água. A parcela inicial da precipitação é retida pela vegetação, quanto maior for a superfície da folhagem, maior a área de retenção de água durante a precipitação. Este potencial de interceptação sobre uma bacia hidrográfica confere à cobertura vegetal um papel primordial no processo da erosão hídrica, servindo como uma manta redutora do potencial desagregador das gotas de chuva. (TUCCI; CLARKE, 1997; MEDEIROS, 2005). Em regiões de Caatinga, esta desempenha um papel ainda maior na contenção dos processos erosivos, dada a fragilidade e vulnerabilidade desse ecossistema, às alterações antrópicas. (BARBOSA; HUETI; BAETHGEN, 2006).

Pesquisas conduzidas em regiões semiáridas, com propósito de avaliar o papel da cobertura vegetal sobre os processos erosivos e escoamento superficial ainda são escassas, porém, a opinião é unânime quanto ao importante papel que essa desempenha sobre a proteção e conservação dos recursos naturais solo e água.

A avaliação dos efeitos de mudança da vegetação nas vazões indica que uma redução da área florestada resulta em um aumento de escoamento superficial. Em pesquisa sobre perdas de solo por erosão hídrica na bacia experimental de Sumé, Srinivasan, Santos e Galvão (2003) constataram o aumento no escoamento superficial em escala de microbacias, quando essas tiveram como tratamento a remoção da cobertura vegetal. Juntamente com a água foi também perdida importante parcela de solo pela maior disponibilidade de energia para a desagregação e transporte de partículas do solo em áreas desmatadas. Albuquerque, Lombardine Neto e Srinivasan (2001) pesquisando o efeito do desmatamento sobre perdas de solo e água em um Luvissole também em Sumé constataram altas taxas de perdas de solo, que foram atribuídas ao efeito da remoção da vegetação. Essas perdas chegaram a atingir um patamar de cerca de 600 vezes mais, quando em comparação com áreas de mata nativa.

O conhecimento do impacto do uso do solo, principalmente com relação a alterações nas condições naturais de cobertura vegetal é fundamental na preservação e uso dos recursos hídricos. A literatura tem apresentado vários artigos de bacias experimentais, que tiveram sofrido modificações com relação à retirada da cobertura vegetal de forma proposital ou não, e demonstraram que o desmatamento é uma prática que produz alterações sobre fluxo de água e carreamento de solo e nutrientes, podendo levar à degradação, ou até mesmo a completa inutilização do solo a longo prazo.

A influência da cobertura vegetal sobre as respostas hidrológicas tem uma participação fundamental sobre o escoamento superficial em escala de bacia, sendo a interceptação pelo dossel foliar o processo principal. Medeiros (2005) estudando os processos de interceptação em condições de Caatinga, verificou perda de água por interceptação na ordem de 14%, apesar do tamanho reduzido da folhagem deste bioma. Segundo o autor este valor é compatível à interceptação em vegetação de floresta. Além da interceptação, parte da água pode ser abstraída pelos troncos, ou retida pela serapilheira, tendo também participação sobre as alterações nas respostas hidrológicas de uma bacia. De acordo com Costa, Botta e Cardille (2003), estudos que relacionam alterações na cobertura vegetal com descarga, tornam necessários levar em consideração o efeito de escala espacial. Os autores supra citados atestam que em bacias pequenas ($< 1 \text{ km}^2$), os desmatamentos causam aumento na vazão média anual, o mesmo efeito não foi confirmado para grandes bacias ($> 100 \text{ km}^2$). O padrão de vegetação tem também forte influência sobre o deflúvio em uma bacia, sendo este padrão segundo Crockford e Richard (2000), associado principalmente ao armazenamento de água pelas folhas, índice de área foliar (LAI – “*leaf area index*”), capacidade de armazenamento pelos arbustos e serapilheira. Os restos culturais que são deixados sobre o solo (serrapilheira) funcionam como mecanismo de redução da velocidade do fluxo de água, favorecendo o aumento da capacidade de infiltração e redução do escoamento, sendo sua remoção um dos fatores envolvidos na alteração das respostas hidrológicas.

Além dos fatores acima mencionados, Iroumé, Mayer e Huber (2006), afirmam que o efeito nas respostas hidrológicas após a remoção da cobertura vegetal, depende além das características da vegetação remanescente e da vegetação que se estabelece a posteriori, de fatores como: declividade, litologia da bacia, característica da precipitação pluviométrica tais como, quantidade, duração, frequência e intensidade. Os referidos autores apontam para uma proporcionalidade no incremento dos picos de descarga em resposta à remoção de cobertura vegetal.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Características da área de estudo

3.1.1 Localização e descrição

As microbacias hidrográficas monitoradas localizam-se na bacia do Alto Jaguaribe, mais precisamente no município de Iguatu, na região Centro Sul do Ceará, entre as coordenadas geográficas 6°23'42'' a 6°23'47'' S e 39°15'24'' a 39°15'29'' W (Figura 3). Todas as microbacias estão situadas em áreas de domínio do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Iguatu-CE (IFCE-Campus de Iguatu). As microbacias apresentaram um caráter experimental com dimensões de pequena escala (GOLDENFUN, 2001), em que se buscou estudos hidrológicos mais detalhados, e onde modificações fisiográficas foram deliberadamente introduzidas. Dessa forma tornou-se necessária a implantação de bacias de pequenas dimensões (não superior a 3 ha).

Os cursos de drenagem são de primeira e segunda ordem segundo a classificação de Strahler (GORDON; MCMAHON; FINLAYSON, 1992), e apresentam vários pontos de dissipação de energia, expressando a ação da declividade sobre a velocidade de deslocamento da água. Apresentam escoamento efêmero, isto é, o fluxo de água sobre o canal principal se faz presente durante e depois do evento pluviométrico em um período médio de tempo não superior a 24 horas após o encerramento da chuva.

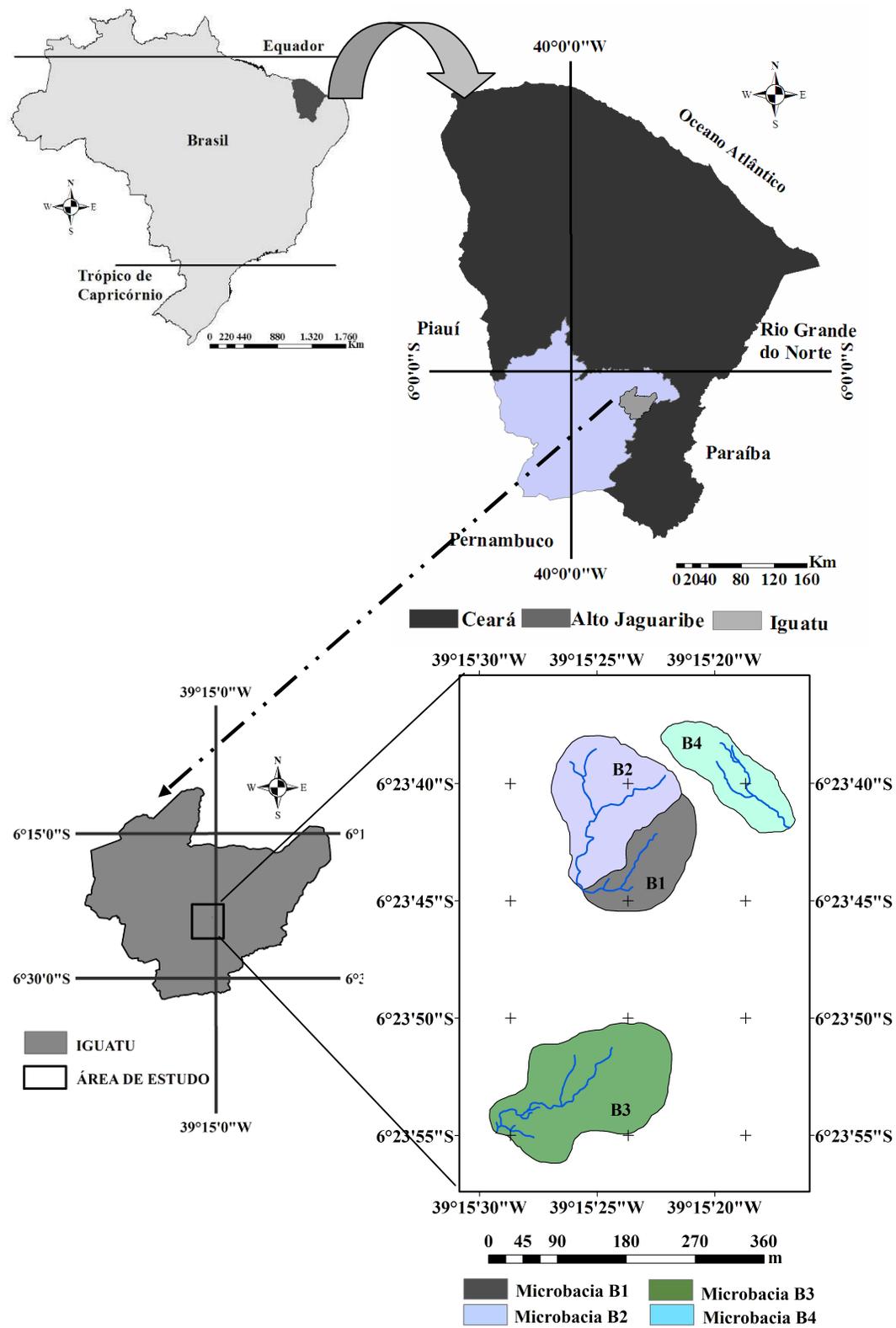


Figura 3 - Localização das microbacias experimentais no Estado do Ceará.

Os estudos na área iniciaram-se em 2007, mais especificamente sobre as microbacias B1 e B2, que foram devidamente delimitadas e caracterizadas por Alves 2008, e serviram de suporte para o presente trabalho. No ano hidrológico de 2007, foram também implementadas duas outras microbacias (B3 e B4). Porém, devido à grande falha nos registros instrumentais, as microbacias B3 e B4 sofreram modificações. A calha Parshall da B3 foi deslocada para um ponto a jusante do ponto de instalação inicial. Essa alteração facilitou os trabalhos de delimitação e caracterização geomorfológica da área, uma vez que se trata de uma microbacia relativamente plana, com difícil percepção dos divisores topográficos. A B4 foi reinstalada em um outro ponto de monitoramento, cobrindo uma mancha de solo com características físicas e químicas diferentes de todas as microbacias anteriormente listadas. O propósito de reinstalação da microbacia B4 foi principalmente verificar a variação dos processos hidrológicos em áreas homogêneas com vegetação Caatinga, porém em solos diferentes. A Tabela 1 estão explicitadas as características morfométricas das unidades experimentais calculadas de acordo com Villela e Matos (1975), e a Tabela 2 apresenta as coordenadas geográficas (UTM – WGS-84) dos principais equipamentos instalados nas microbacias.

Tabela 1 – Características morfométricas das microbacias experimentais: B1, B2, B3 e B4

Características	Microbacias				Unidades
	B1 caatinga raleada	B2 caatinga nativa	B3 caatinga nativa	B4 caatinga nativa	
Área da bacia (Ab)	1,15	2,06	2,80	1,19	ha
Perímetro (P)	478,35	594,50	696,75	491,75	m
Comprimento do talveque (Lt)	120,54	183,87	187,90	142,80	m
Comprimento do curso principal	147,18	252,11	238,20	150,30	m
Comprimento da bacia (Lb)	188,17	204,40	253,90	208,50	m
Declividade da bacia (Db)	8,72	10,59	5,57	10,63	%
Fator de forma (Rf)	0,32	0,49	0,43	0,27	-
Coefficiente de compacidade	1,25	1,16	1,17	1,26	-
Densidade de drenagem	153,80	192,59	146,29	209,41	m ha ⁻¹
Tempo de concentração (Tc)	0,05	0,06	0,07	0,05	h
Extensão média do escoamento	19,50	20,50	29,40	19,82	m
Sinuosidade do curso principal	1,20	2,06	2,8	1,19	-

Tabela 2 – Coordenadas geográficas dos equipamentos instalados nas microbacias

Equipamentos	UTM*	
	N (m)	E (m)
Calha Parshall B1	9293041	471570
Calha Parshall B2	9293053	471560
Calha Parshall B3	9292730	471454
Calha Parshall B4	9293126	471835
Coletor Sedimentos B1	9293060	471581
Coletor Sedimentos B2	9293054	471552
Coletor Sedimentos B3	9292736	471464
Coletor Sedimentos B4	9293130	471830
Pluviógrafo B1/B2	9293057	471569
Pluviógrafo B3	9292730	471469
Pluviógrafo B4	9293128	471844

* Coordenadas com sistema de projeção UTM, WGS-84, 24 S.

3.1.2 Características do solo

As microbacias são partes integrantes da depressão sertaneja setentrional onde as manchas de solos predominantes estão classificadas como Aluviais, Litólicos, Podzólicos Vermelho-amarelo e Vertissolos (IPECE, 2004). A geologia da região, segundo levantamentos da Superintendência de Desenvolvimento do Estado do Ceará (SUDEC, 1980), caracteriza-se por ser sedimentar formada por sedimentos meso microclástico, que sofreram um processo de afundamento, proporcionando a formação de solos com relevo plano a suave ondulado. O relevo plano está representado, predominantemente, pela superfície aluvial, enquanto o relevo suave ondulado encontra-se nos tabuleiros mais elevados, que se formaram por um intenso processo erosivo em solos muito argilosos, com argila do tipo 2:1, grupo montimorilonita. Por apresentar essa característica, este relevo possui uma formação irregular, com pequenas elevações intercaladas por pequenas áreas planas.

O relevo é pouco acidentado, com solos relativamente profundos com presença elevada de silte nas camadas superficiais e subsuperficiais. Devido ao tipo de argila presente nos solos das microbacias é comum a surgimento de rachaduras na superfície nas épocas secas do ano, e encharcamento no período chuvoso, conforme averiguações de Alves (2008), tornando-se a área de difícil acesso e locomoção. Usando-se de sondagens de campo através de tradagens nas microbacias B1 e B2, observou-se presença de solos com caráter Franco a Franco-argiloso, e na microbacia B3 observou-se pouca diferenciação textural no perfil até

uma profundidade de 90 cm, e da mesma forma que em B1 e B2, com presença de silte e argila (Tabelas 3, 4 e 5). Já na microbacia B4, até a uma profundidade de 15 cm constatou-se uma textura mais arenosa (Tabela 6), sendo as camadas mais profundas com aspecto Franco-argiloso conjugado a pedregulhos. Tais averiguações de campo são importantes para compreender o caráter estrutural e armazenamento de água no solo. As Figuras 4a e b evidenciam a situação das microbacias nas duas épocas do ano (seca e úmida).



[a]



[b]

Figura 4 – [a] Detalhe da estrutura do solo no período seco; [b] Condição de encharcamento dos solos em pontos de acesso às microbacias no período chuvoso.

Para caracterização físico-química do solo foram coletadas amostras deformadas em diversos pontos, em cada microbacia, na profundidade de 0-15 cm, formando uma amostra composta representativa da B1, B2, B3 e B4. Todas as análises foram realizadas nos Laboratórios de Física e Química do Departamento de Solos da Universidade Federal do Ceará. Os parâmetros físico-químicos do solo das quatro microbacias podem ser observados, nas Tabelas 3 a 6. Atenção especial é dada ao alto teor de matéria orgânica, principalmente na camada superficial do solo, como consequência de serapilheira, devido queda da folhagem, característico da vegetação da Caatinga.

Tabela 3 – Dados de análise físico-química do solo microbacia da B1

Profundidade	0 – 15
Parâmetros físicos	
Granulometria (%)	
Areia Fina	11
Areia Grossa	32
Silte	46
Argila	11
Grau de Floculação (%)	90
Densidade das Partículas (g cm ⁻³)	2,59
Classe textural	Franca
Parâmetros químicos	
M.O (%)	2,03
Cálcio (cmol _c kg ⁻¹)	28,20
Magnésio (cmol _c kg ⁻¹)	5,80
Sódio (cmol _c kg ⁻¹)	0,14
Potássio (cmol _c kg ⁻¹)	0,63

Tabela 4 – Dados de análise físico-química do solo microbacia da B2

Profundidade	0 – 15
Parâmetros físicos	
Granulometria (%)	
Areia Fina	24,20
Areia Grossa	3,20
Silte	42,60
Argila	30,00
Grau de Floculação (%)	50,00
Densidade das Partículas (g cm ⁻³)	2,56
Classe textural	Franco Argilosa
Parâmetros químicos	
M.O (%)	2,53
Cálcio (cmol _c kg ⁻¹)	40,40
Magnésio (cmol _c kg ⁻¹)	4,60
Sódio (cmol _c kg ⁻¹)	0,23
Potássio (cmol _c kg ⁻¹)	0,94

Tabela 5 – Dados de análise físico-química do solo da microbacia B3

Profundidade	0 – 15
Parâmetros físicos	
Granulometria (%)	
Areia Fina	26,50
Areia Grossa	9,90
Silte	34,80
Argila	28,80
Grau de Floculação (%)	80,00
Densidade das Partículas (g cm ⁻³)	2,58
Classe textural	Franco Argilosa
Parâmetros químicos	
M.O (%)	2,60
Cálcio (cmol _c kg ⁻¹)	13,20
Magnésio (cmol _c kg ⁻¹)	5,00
Sódio (cmol _c kg ⁻¹)	1,56
Potássio (cmol _c kg ⁻¹)	0,34

Tabela 6 – Dados de análise físico-química do solo da microbacia B4

Profundidade	0 – 15
Parâmetros físicos	
Granulometria (%)	
Areia Fina	63,90
Areia Grossa	11,70
Silte	16,90
Argila	7,50
Grau de Floculação (%)	39,00
Densidade das Partículas (g cm ⁻³)	2,56
Classe textural	Franco Arenosa
Parâmetros químicos	
M.O (%)	2,50
Cálcio (cmol _c kg ⁻¹)	2,70
Magnésio (cmol _c kg ⁻¹)	2,30
Sódio (cmol _c kg ⁻¹)	0,04
Potássio (cmol _c kg ⁻¹)	0,16

3.1.3 Clima

O clima da região segundo a classificação de Köppen (1948) é do tipo BSw'h', clima semiárido com precipitações pluviométricas máximas de outono, e temperatura média mensal sempre superior a 18 °C. A precipitação média histórica no município de Iguatu entre

os anos de 1974/2008 demonstrou valor médio de 970 ± 316 mm (Figura 5), com valores mínimos e máximos de 433 e 2072 mm, registrados nos anos de 1983 e 1985, respectivamente (FUNCEME, 2009), o que expressa a alta variabilidade dos eventos pluviométricos da região. Podem ocorrer na região grandes variações das intensidades de precipitação como decorrência das características dos eventos hidrológicos nas regiões semiáridas do Nordeste brasileiro. (RODRIGUES et al., 2008; PONCE, 1995). A precipitação pluviométrica na região concentra-se principalmente nos meses de janeiro a maio, sendo os maiores valores constatados no mês de março. A distribuição mensal é marcada por uma alta variabilidade, podendo em um único mês, concentrar um acumulado superior ao total anual de um ano seco, conforme apresentado na Figura 6. O ano hidrológico normalmente inicia-se na metade do mês de janeiro, quando os primeiros eventos de precipitação pluviométrica são suficientes apenas para umedecer o solo depois de longos períodos sem chuva (junho/dezembro), sendo o escoamento superficial observado normalmente para eventos acumulados maiores que 100 mm, conforme observações dos anos hidrológicos de 2008 e 2009. Essa distribuição é influenciada principalmente pela Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), do Atlântico Norte que, de acordo com Xavier (2001), é a faixa correspondente ao encontro dos alísios de sudeste com os alísios de nordeste, sendo a ZCIT influenciada pelas temperaturas oceânicas.

A região de Iguatu mostrou, de acordo com a série histórica, uma alta variabilidade temporal, apresentando 17 anos abaixo da média histórica e uma distribuição média anual com apenas 57 dias com chuva e desvio padrão de 16 dias. A região é caracterizada também por altas taxas evaporativas, com medida em tanque classe “A” chegando a uma média de 2943 mm ano^{-1} estando as médias mensais com maiores valores durante os sete meses de menor precipitação. (PALÁCIO, 2004). As temperaturas médias mais altas ocorrem entre setembro e janeiro, relacionando-se com a forte insolação e baixa nebulosidade durante esse período.

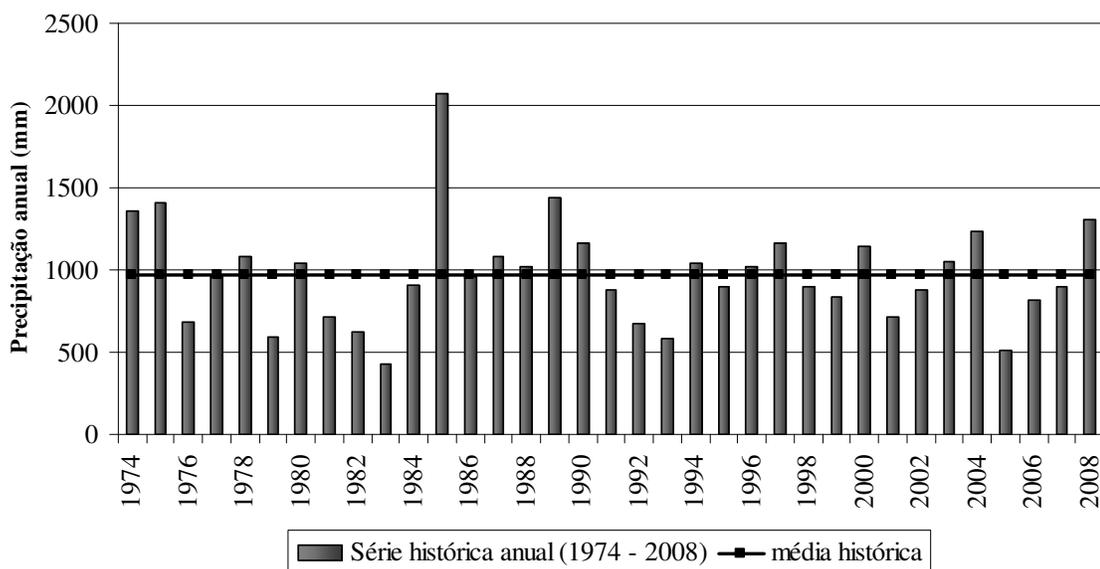


Figura 5 – Série histórica anual de precipitação pluviométrica no posto Iguatu no município de Iguatu – CE.

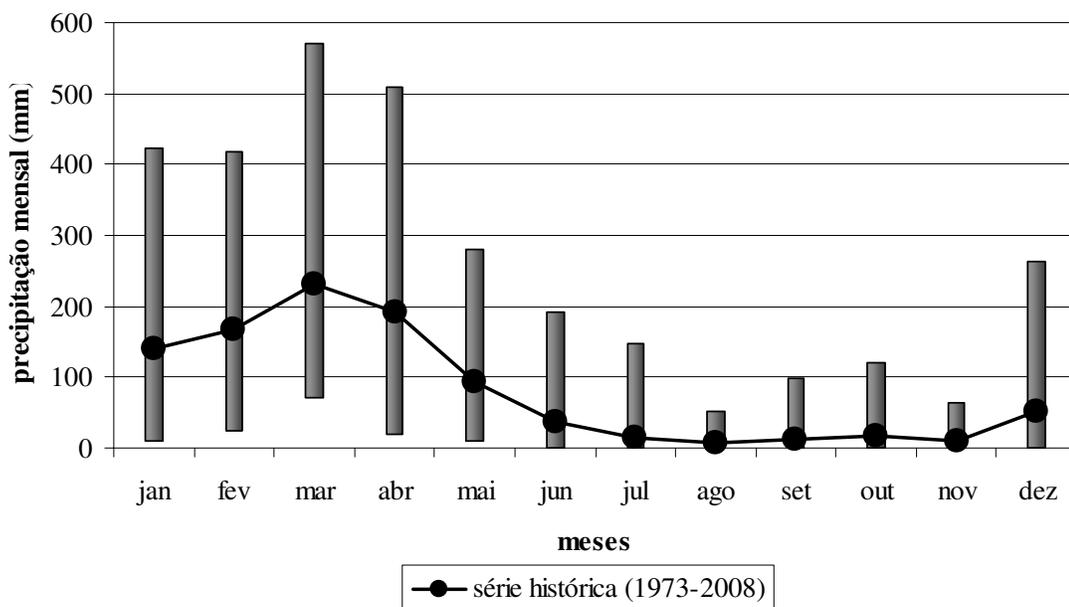


Figura 6 – Série histórica mensal de precipitação pluviométrica no posto de Iguatu – CE. As barras verticais representam a amplitude mensal para a série histórica entre 1973 e 2008.

3.1.4 Vegetação

A composição da vegetação é tipicamente Caatinga, com caráter variável, desde espécies de porte herbáceo a arbóreo-arbustivo, tipicamente caducifólio de caráter xerófilo com grande variedade de espécies espinhosas. Devido à ação do homem na remoção da vegetação como prática extrativista é comum encontrar zonas com vegetação de menor porte.

Com base em levantamentos da flora nas microbacias realizados por Alves (2008) e Lopes (2008), a estrutura de cobertura vegetal encontrada na área é formada principalmente por espécies vegetais herbáceas, como *Hyptis suaveolens* (L.) poiteau (Bambural) e *Hyptis* sp. (melosa); seguido em menor proporção de espécies vegetais de caráter arbustivo e arbóreo como *Aspidosperma pyriforme* Mart (Pereiro), estes indivíduos apresentaram maior expressão na microbacia B1, na microbacia B2 as espécies herbáceas de maior densidade de indivíduos são novamente a *Hyptis* sp. e *Cróton* sp., seguida como na microbacia B1 da espécie arbórea arbustiva *Aspidosperma pyriforme* Mart. A bacia experimental B3 tem como espécies vegetais herbáceas predominantes a *Hyptis suaveolens* (Bambural) e *Hyptis* sp. (Melosa), sendo a *Aspidosperma pyriforme* Mart (Pereiro) a espécie arbórea com maior número de indivíduos.

No ano hidrológico de 2008, os equipamentos da microbacia experimental B4, tiveram que ser removidos e reinstalados em uma nova microbacia adjacente às bacias B1 e B2, conduzindo, dessa forma, a um novo processo de delimitação e caracterização desta. Por essa razão os trabalhos de classificação da flora não se apresentam ainda totalmente concluídos, porém, sabe-se de ante mão que além das espécies anteriormente mencionadas, há presença em grande parte da microbacia, da espécie *Selaginella convoluta* (jericó) (Figura 7), que forma uma manta rasteira sobre o solo dessa unidade experimental.



Figura 7 - Detalhe da cobertura morta vegetal rasteira da espécie *Selaginella Convolvuta* sobre a microbacia experimental B4

Na Tabela 7 esta explicitada as percentagens dos componentes de cobertura vegetal encontrados nas microbacias. Para quantificação da cobertura vegetal dos componentes arbóreo-arbustivo, adotaram-se parcelas de 10 x 10 m com sete repetições por bacia, sendo o valor obtido com auxílio do software FITOPAC 2.0. Já o componente herbáceo foi obtido através de amostragem em subparcelas 1 x 1 m de acordo com descrição de Felfili, Carvalho e Haidar (2005).

Tabelas 7 – Percentagem dos componentes da cobertura vegetal encontrados nas microbacias experimentais

Cobertura vegetal	Microbacias				Unidades
	B1 Caatinga raleada	B2 Caatinga nativa	B3 Caatinga nativa	B4 Caatinga nativa	
Componente arbóreo- arbustivo (diâmetro ≥ 10 cm)	11	25	39	24	%
Componente arbóreo- arbustivo (diâmetro < 10 cm)	7	24	23	45	%
Extrato herbáceo	100	70	60	50	%
Total	117	119	122	119	%

Torna-se importante relatar que há, em todas as microbacias, uma grande quantidade de cobertura morta sobre o solo como consequência da queda natural da folhagem das espécies da Caatinga, uma forma adaptativa e fisiológica da vegetação local de conseguir reduzir as perdas de água por evapotranspiração. A folhagem que cai sobre o solo forma uma camada de proteção ao solo (Figura 8a), contra a ação do impacto das gotas das chuvas e redução dos processos de desagregação do solo e transporte de material erodido (LOBATO, 2008). Em grande parte da bacia B1 encontram-se presentes espécies herbáceas de caráter forrageiro recobrando a superfície do solo (Figura 8b).

**[a]****[b]**

Figura 8 - **[a]** Detalhe da cobertura morta e **[b]** Parte da microbacia B1 coberta por espécie forrageira herbácea.

3.2 Delimitação das microbacias experimentais

A delimitação das microbacias foi efetuada pela geração do Modelo Numérico do Terreno (MNT), com dados obtidos em campo. Para isso foram necessárias coletas de pontos ao longo de cada microbacia (sendo escolhidos mediante observações dos divisores topográficos, ou da sua sinalização). Empregou-se um GPS diferencial LEICA (System 1200) para o levantamento. As campanhas foram conduzidas com propósito de reconhecimento e delimitação das microbacias experimentais B1 e B2.

Para aquisição dos dados empregaram-se dois equipamentos de GPS, um classificado como “móvel”, e outro com denominação de “Fixo”, empregado para corrigir os valores aquiritados pelo GPS móvel. Na ausência do GPS fixo, como ocorreu em duas das quatro campanhas realizadas, os dados foram pós-processados e corrigidos empregando-se a

estação Base de Crato. Maiores detalhes do processo de pós-processamento dos dados podem ser encontrados em Alves (2008).

De posse dos dados pós-processados, com auxílio do software Arcmap 9.2, confeccionou-se um Grid de pontos interpolados definindo assim o MNT das microbacias. O método de interpolação empregado foi a krigagem, sendo o variograma exponencial o de melhor ajuste dos pontos. (KRAEMER, 2007). A partir do MNT, definiram-se as declividades e áreas das microbacias, e a partir dessas, realizou-se o processo de caracterização morfométrica e fisiográfica das unidades experimentais.

O levantamento planialtimétrico para delimitação das unidades experimentais B3 e B4 foi conduzido pelo emprego de um Taqueômetro ou Estação Total, equipamento eletrônico de alta precisão vertical (RODRIGUES et al., 2006), com medições de ângulos horizontais, verticais e distâncias. O equipamento empregado refere-se a uma estação total LEICA modelo TC407. O ponto inicial de entrada foi coletado com GPS diferencial SR20 LEICA, com datum WGS 84 sistema de coordenadas UTM, e os demais foram levantados e corrigidos a partir deste. O pós-processamento foi conduzido através do software topeAVN, cujo arquivo foi convertido para formato ASCII e processado no Arcmap 9.2, em que se confeccionou o Modelo Numérico do Terreno (MNT) das microbacias. As campanhas para coleta de dados ocorreram de forma aleatória em três oportunidades nos meses de março e maio de 2009, sendo o total de pontos empregados iguais a 508 e 410 para as microbacias B3 e B4, respectivamente.

3.3 Unidades experimentais

3.3.1 Microbacias hidrográficas

A microbacia B1 possui uma área de drenagem de 1,15 ha, com declividade média de 8,7% (Tabela 1), essa microbacia foi raleada (Figura 9b), prática bastante empregada por pequenos agricultores do semiárido brasileiro. Este tratamento foi aplicado com propósito de verificar a influência da prática de desmatamento na Caatinga, sobre escoamento superficial, erosão hídrica e produção de sedimentos em pequenas bacias rurais. Foram mantidas na área as espécies vegetais com diâmetro igual ou maior que 10 cm, e

espécies de crescimento herbáceo. Torna-se importante salientar também, que parte da vegetação que foi cortada ficou sobre o solo. O tratamento foi aplicado no início de novembro de 2008, sendo que as primeiras chuvas ocorreram na primeira quinzena de janeiro de 2009, aproximadamente dois meses depois. As Figuras 9a e b mostram as condições de vegetação da microbacia B1 antes e depois do tratamento na estação chuvosa, enquanto as Figuras 10a e b representam as mesmas condições durante a estação seca, período em que o raleamento foi aplicado (novembro/2008).



Figura 9 – Visão parcial das condições de vegetação da microbacia experimental B1, na estação chuvosa antes [a] e depois [b] do raleamento.



Figura 10 – Visão parcial das condições de vegetação da microbacia experimental B1, na estação seca antes [a] depois [b] do raleamento.

As demais microbacias experimentais B2, B3 e B4 foram mantidas inalteradas, sem intervenção antrópica, representando condições naturais de pequenas bacias rurais do semiárido do Nordeste. A unidade experimental B2 apresentou área drenada de aproximada de 2,06 ha, com declividade média de 10,6%, já B3 com maior área de drenagem entre as quatro microbacias, se configura em área bastante plana com muitos pontos de empocamento de água com grande depósito de sedimentos nas áreas mais baixas. O valor de declividade

média foi de apenas 5,5% (Tabela 1). A microbacia B4 com área de drenagem de 1,19 ha apresenta uma estrutura de solo e vegetação diferente, conferindo respostas hidrológicas diferentes. Os solos mostraram-se com características mais arenosas (Tabela 6), com maior abstração da água drenada, e com valor de condutividade hidráulica saturada e porosidade total também superior, o que lhe confere um maior poder de infiltração.

3.3.2 Monitoramento das microbacias

As quatro microbacias foram equipadas com pluviômetros, calhas Parshall, sensores de temperatura do ar e solo, sensores de umidade relativa do ar, pluviógrafos automáticos. Foram ainda realizados acompanhamento da umidade do solo e produção de sedimentos. Todos os dados climatológicos foram coletados por meio de uma plataforma de coleta de dados (PCD) instalada em cada microbacia e programada para obtenção de dados a cada cinco minutos. Este intervalo de tempo foi adotado, em função das altas intensidades de chuvas que ocorrem na região, e também pelo baixo tempo de concentração das unidades avaliadas.

Para efeito de quantificação do escoamento superficial e estimativa das curvas-chave de sedimentos, que relaciona a vazão que passa nos cursos para um dado evento, e produção de sedimentos nesse evento, foram realizadas nas microbacias experimentais, medições contínuas de precipitação pluviométrica, deflúvio e de produção de sedimentos. A parte de implementação dos equipamentos ocorreu em novembro de 2007, e o monitoramento propriamente dito, foi iniciado em janeiro de 2008, com coleta de dados principalmente nas bacias B1 e B2. Porém o acompanhamento e coleta de dados sobre todas as microbacias ocorreram apenas para o ano hidrológico de 2009. As coletas dos dados analisados nessa pesquisa, portanto, abrange 2009 e alguns eventos nos meses de janeiro, fevereiro e março de 2008, para a microbacia B2, tornando-se importante ressaltar que neste ano não foi possível, estabelecer relação entre vazão e produção de sedimentos, por escassez de dados, e também falhas nos instrumentos, problemas estes contornados no ano hidrológico de 2009.

3.4 Ensaios para avaliação da infiltração de água no solo

3.4.1 Determinação da condutividade hidráulica saturada do solo

A condutividade hidráulica saturada (K_{sat}) do solo representativa das microbacias foi determinada em condições de campo nas profundidades de 0-30 e 30-60 cm, com um permeâmetro de carga constante conhecido como Amoozometer (AMOOZEGAR, 1992 apud ZIEGLER et al., 2006), conforme ilustração da Figura 11. O mecanismo de funcionamento do equipamento é totalmente hidráulico, em que se busca atingir uma taxa de infiltração de água constante no solo, e através dessa com o emprego de um modelo adequado, encontrar o parâmetro condutividade hidráulica saturada. Os ensaios com equipamento podem levar intervalos de tempo desde alguns minutos até algumas horas, dependendo da textura, estrutura e umidade. Para as microbacias B1, B2 e B3 o tempo médio de ensaio foi de 2,5 h, já para a microbacia B4, o tempo foi inferior a 30 minutos. Devido à pequena dimensão das unidades de experimentais, foi conduzido um ensaio por profundidade para cada uma das quatro microbacias.



Figura 11 – Equipamento de medição de condutividade hidráulica saturada (Amoozometer).

O equipamento é constituído basicamente de dois reservatórios sendo um deles com capacidade de 4 L e o outro de 1 L de água (permitindo assim a condução de um ensaio com um pequeno volume), válvulas de saída, um tubo de suprimento conectado a um dispositivo dissipador de água, e vários conectores que evitam a entrada de ar no sistema (Figura 12a). Possui também quatro pequenos reservatórios onde são aplicadas as cargas de água (H_1) de forma a manter a sua carga de água H constante (Figura 12b), conforme um pré-dimensionamento que depende da profundidade do solo que se deseja estudar.

O procedimento envolve a confecção de um furo cilíndrico no solo de raio (r), à profundidade desejada com auxílio de um trado, em que é estabelecida uma carga de água (H) constante, desde que $H/r \geq 5$. (AMOOZEGAR; WARRICK, 1986 apud ZIEGLER et al., 2006). As medições são conduzidas através de leituras na régua fixada no reservatório de 1 L, estas são realizadas até que o fluxo de água atinja o estado permanente (Q) de água no solo. O cálculo da K_{sat} é conduzido através da solução de Glover, que depende apenas da profundidade de água no orifício H , do raio de orifício r , e do fluxo permanente de água Q , dada por:

$$K_{sat} = Q * A * 600 \dots\dots\dots (1)$$

Em que:

K_{sat} – Condutividade hidráulica saturada (mm h^{-1});

Q – Fluxo de água no estado permanente ($\text{cm}^3 \text{min}^{-1}$);

A – Coeficiente da equação de Glover (cm^{-2})

$$A = \begin{cases} \frac{\sin h^{-1}(H/r) - ((r/H)^2 + 1)^{0.5} + r/H}{2\pi H^2} & \text{para } D \geq 2H \\ \frac{3 \ln(H/r)}{\pi H(3H + 2s)} & \text{para } D \leq 2H \end{cases} \dots\dots\dots (2)$$

Em que:

H - distância da parte inferior do orifício ao nível de água (cm);

r - raio do orifício (cm);

s - representa a distância da camada impermeável do solo à parte inferior do orifício (cm)

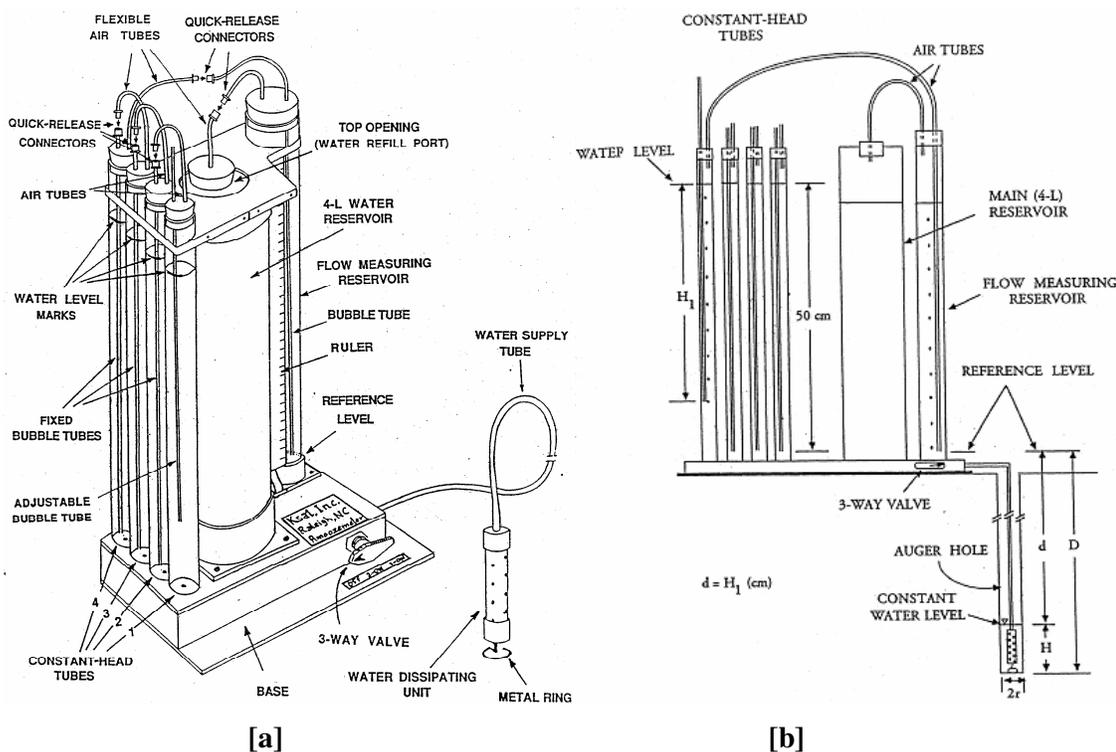


Figura 12 – Diagrama esquemático dos componentes da Amoozometer [a] e corte transversal de equipamento com ilustração para dimensionamento [b].

3.4.2 Determinação da macro e microporosidade do solo

Para caracterização da porosidade total, macro e microporosidade e densidade do solo foram coletadas amostras indeformadas nas profundidades de 5 e 15 cm para cada uma das quatro microbacias, com três repetições fazendo um total de 30 amostras. Para isso foi utilizado um amostrador de solo tipo Uhland, com anéis volumétricos de 0,03 m de altura e 0,052 m de diâmetro. As amostras foram acondicionadas em filme plástico e enviadas ao Laboratório de Física dos Solos da Universidade Federal do Ceará onde as determinações foram realizadas.

No laboratório as amostras foram então embebidas, saturadas e colocadas na mesa de sucção, ajustada à tensão de 0,006 MPa, sendo retirada a água dos macroporos (poros como diâmetro $\geq 0,05$ mm). Após a retirada parcial da água, as amostras foram pesadas e levadas para secagem em estufa a 105 °C por 12 h, determinando-se o volume de microporos da amostra conforme Embrapa (1997). A porosidade total (P_T , %) foi calculada como o soma entre macro e microporosidade.

A macroporosidade (%) foi calculada pela diferença entre P_T e microporosidade, e a densidade do solo determinada pela razão entre a massa e o volume do solo seco, conforme equação:

$$D_s = \frac{m_s}{V_s} \dots\dots\dots (3)$$

Em que:

D_s - densidade do solo seco, ($g\ cm^{-3}$);

m_s - massa do solo seco, (g);

V_s - volume do solo seco, (cm^{-3});

Para avaliar os resultados da macro e microporosidade, porosidade total e densidade do solo, os dados foram submetidos à análise de variância e posteriormente quando significativo a um nível de 5% de probabilidade pelo teste F, foram realizados teste Tukey de comparação de média, através do SPSS.

3.4.3 Determinação da umidade do solo

Como forma de caracterização do comportamento hidrológico das microbacias periodicamente, amostras de solo foram coletadas de forma randômica em pontos distintos para cada nova coleta, sendo esta conduzida na profundidade de 20 cm nas quatro unidades em um total de três repetições por bacia. As análises foram realizadas no Laboratório de Solos e Tecidos Vegetais do IFCE-Campus de Iguatu empregando o método gravimétrico. (KOHNE, 1968).

3.5 Processo Chuva-Deflúvio

3.5.1 Pluviômetros e pluviógrafos

Três estações pluviográficas foram utilizadas para monitoramento dos dados de precipitação pluviométrica nas microbacias avaliadas, com uma delas abrangendo as bacias B1 e B2, e outras duas para as bacias B3 e B4. Empregou-se para tanto pluviógrafos de

básculas, desenvolvidos e calibrados no Laboratório de Eletrônica e Mecânica da Agronomia (LEMA) do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal do Ceará (UFC). Os pluviógrafos de báscula foram calibrados para uma resolução de 0,254 mm, e os dados foram adquiridos e enviados para memória interna do datalogger de uma PCD automática em cada uma das microbacias, registrando dados a cada cinco minutos (Figura 13a). Maiores detalhes da calibração e confecção do equipamento são encontrados em Alves (2008) e Canafístula et al. (2008). Os dados intervalares foram importantes para cálculo das altas intensidades de chuvas, que normalmente ocorrem em curtas durações, e para o cômputo do I_{30} (intensidade máxima da precipitação pluviométrica no intervalo de 30 min), necessário na determinação da energia cinética das gotas de chuva e, conseqüentemente, da erosividade da precipitação. As quatro microbacias foram equipadas também com três pluviômetros *Ville de Paris* sendo um deles situado na B3, outro na B4, e um terceiro representativo das bacias B1 e B2 (Figura 13b). Os dados nos pluviômetros eram coletados, com representatividade de chuvas, com duração de 24 h, servindo como dado assistente aos do pluviógrafo de báscula.

Os dados pluviométricos referentes à série histórica (Figuras 5 e 6) foram coletados em um posto pluviométrico na cidade de Iguatu a 8 km da área de estudo. (FUNCEME, 2009).



Figura 13 – Detalhe do Pluviógrafo de báscula [a] e Pluviômetros do tipo Ville de Paris [b].

3.5.2 Calha Parshall

O deflúvio superficial foi monitorado através de quatro calhas Parshall, uma para cada microbacia, sendo essas confeccionadas em fibra de vidro (Figura 14), dimensionadas para um evento com intensidade de 50 mm h^{-1} . (ALVES, 2008). Na Figura 16 pode-se observar o posicionamento atual de uma das calhas no campo (B2) e em funcionamento. A equação das calhas empregadas nesse estudo segue a equação 4, calculada segundo Bernardo, Soares e Mantovani (2006).



[a]

[b]

Figura 14 – Confeção das calhas Parshall em fibra de vidro [a] e instalação em campo com estrutura de alvenaria [b].

$$Q = 3,72W * 0.0086^{W^{0.026}} * Hm^{1.393 * W^{0.026}} \dots\dots\dots (4)$$

Em que:

Q - corresponde a vazão da calha Parshall ($L \text{ s}^{-1}$);

W - representa a largura do estrangulamento (cm), com valor de 47,5 para calhas de B1, B2, e 30 para B3 e B4;

Hm - expressa a altura da coluna d'água no ponto a montante do estrangulamento (cm).



Figura 15 – Detalhe da calha Parshall instalada em campo (maio 2008), [a] visão geral, [b] em funcionamento.

A partir das elevações de nível de água ou cotas registradas no linígrafo automático (ver seção 3.8.3), que foram coletadas continuamente em intervalos de 5 minutos, converteu-se posteriormente em vazão mediante equação específica de cada calha. Os dados de vazão correlacionados com o tempo proporcionaram a geração de hidrógrafas para cada evento de chuva correspondente.

O volume de água escoado nos canais das microbacias durante um evento de precipitação foi obtido pela seguinte expressão:

$$V = \sum_{t_0}^{t_n} Q(t)\Delta t \dots\dots\dots (5)$$

Em que:

V – volume de água escoado correspondente a cada chuva, L;

t_0 – tempo de início do escoamento superficial, s;

t_n - tempo de término do escoamento superficial, s;

$Q(t)$ – vazão em função do tempo, $L s^{-1}$, e

Δt – intervalo de tempo de escoamento, s.

O volume escoado foi correlacionado com a área da bacia para obtenção do deflúvio ou lâmina escoada, de acordo com a expressão:

$$D = \frac{V}{A} * 1000 \dots\dots\dots (6)$$

Em que:

D – representa o deflúvio (mm); V – volume escoado (m^3) e A – área da bacia (m^2).

O coeficiente de escoamento superficial (C), que expressa o quanto da precipitação (PPt) converte-se em deflúvio, foi calculado pela razão entre o deflúvio e a precipitação, segundo a equação 7.

$$C = \frac{D}{PPt} \dots\dots\dots (7)$$

3.5.3 Sensor de nível de água (Linígrafo)

O escoamento superficial foi monitorado por um sensor capacitivo desenvolvido no Laboratório de Eletrônica e Mecânica Agrícola (LEMA) do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal do Ceará, funcionando como um linígrafo, que foi instalado em um poço tranquilizador ao lado das calhas Parshall. Este foi construído na forma retangular em placas de circuito (fibra de vidro), com espessura, largura e tamanho aproximados de 0,2 x 2 x 70 cm, respectivamente (Figura 16). As placas posicionadas paralelamente definem os eletrodos do capacitor, separadas em 0,5 cm e cobertas por verniz. (CRUZ et al., 2007).



Figura 16 – Sensor capacitivo para monitoramento do nível de água na calha Parshall.

O sensor foi desenvolvido para medir frequência (kHz), sendo então necessária uma calibração. O processo de calibração foi conduzido em laboratório, onde a priori o sensor foi acondicionado e fixado em um reservatório cilíndrico, apresentando este, na parte inferior, um orifício de saída (Figura 17). Na lateral do cilindro foi acoplado um piezômetro, no qual se realizaram leituras do nível de água. A água era adicionada ao reservatório com auxílio de uma proveta. No processo inverso, a água era retirada do reservatório. Geraram-se, a posteriori, equações frequência versus altura da coluna de água do tipo: logarítima para altura de até 49 cm, e linear para as demais alturas. A Figura 18 mostra um gráfico obtido da calibração de um sensor de nível de água. Na Tabela 8 estão explicitadas as equações dos quatro sensores calibrados para cada microbacia.



Figura 17 – Equipamento empregado para calibração do sensor de nível de água no LEMA.

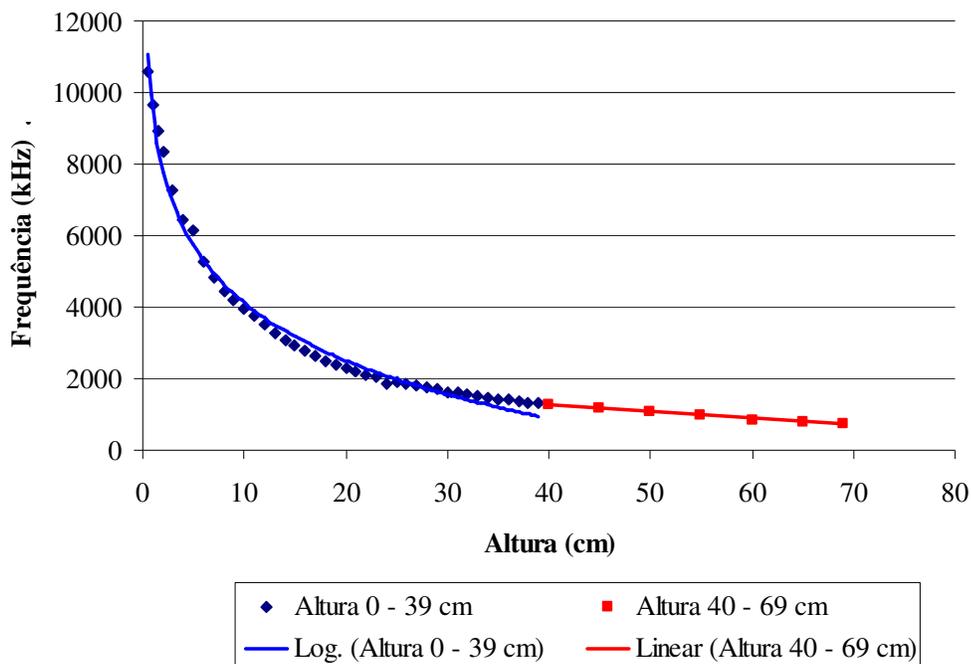


Figura 18 – Modelo de gráfico de calibração empregado nas calhas Parshall das microbacias.

Tabela 8 – Equações de regressão para conversão de frequência em altura de coluna de água na calha Parshall

Microbacias	Equações de Conversão			
	$0 \leq H < 39$ cm (Logarítmica)	R^2	$39 \leq H < 60$ cm (Linear)	R^2
B1	Freq = $-2326,1 \ln(h) + 9469,6$	0,99	Freq = $-19,331h + 2046,6$	0,99
B2	Freq = $-2217,3 \ln(h) + 8970,5$	0,99	Freq = $-17,192h + 1896,9$	0,99
B3	Freq = $-2415,7 \ln(h) + 9880,7$	0,98	Freq = $-17,623h + 2039,5$	0,98
B4	Freq = $-2207,4 \ln(h) + 9150,3$	0,99	Freq = $-18,517h + 2055,8$	0,99

3.5.4 Sensores de Umidade relativa do ar, temperatura do solo e ar

As microbacias foram ainda equipadas com sensores de umidade relativa do ar, temperatura do ar e do solo, todos desenvolvidos, calibrados e testados no Laboratório de Eletrônica e Mecânica da Agronomia (LEMA), do Departamento de Engenharia Agrícola

(DENA) da Universidade Federal do Ceará. Os dados foram coletados e armazenados em uma estação hidro-meteorológica automática (Figura 19), alimentada por um painel solar. Estes eram armazenados a cada 5 minutos com um nível de leitura a intervalos de 30s. A estação automática possui um programa de aquisição de dados (Estação), com memória que coleta e armazena dados por um período de aproximadamente um mês. Os dados foram coletados em 24 horas após um evento de chuva, ou no máximo a cada três dias, utilizando um computador portátil, procedimento adotado como forma de evitar perdas de dados por eventuais falhas de funcionamento do sistema automático de aquisição.

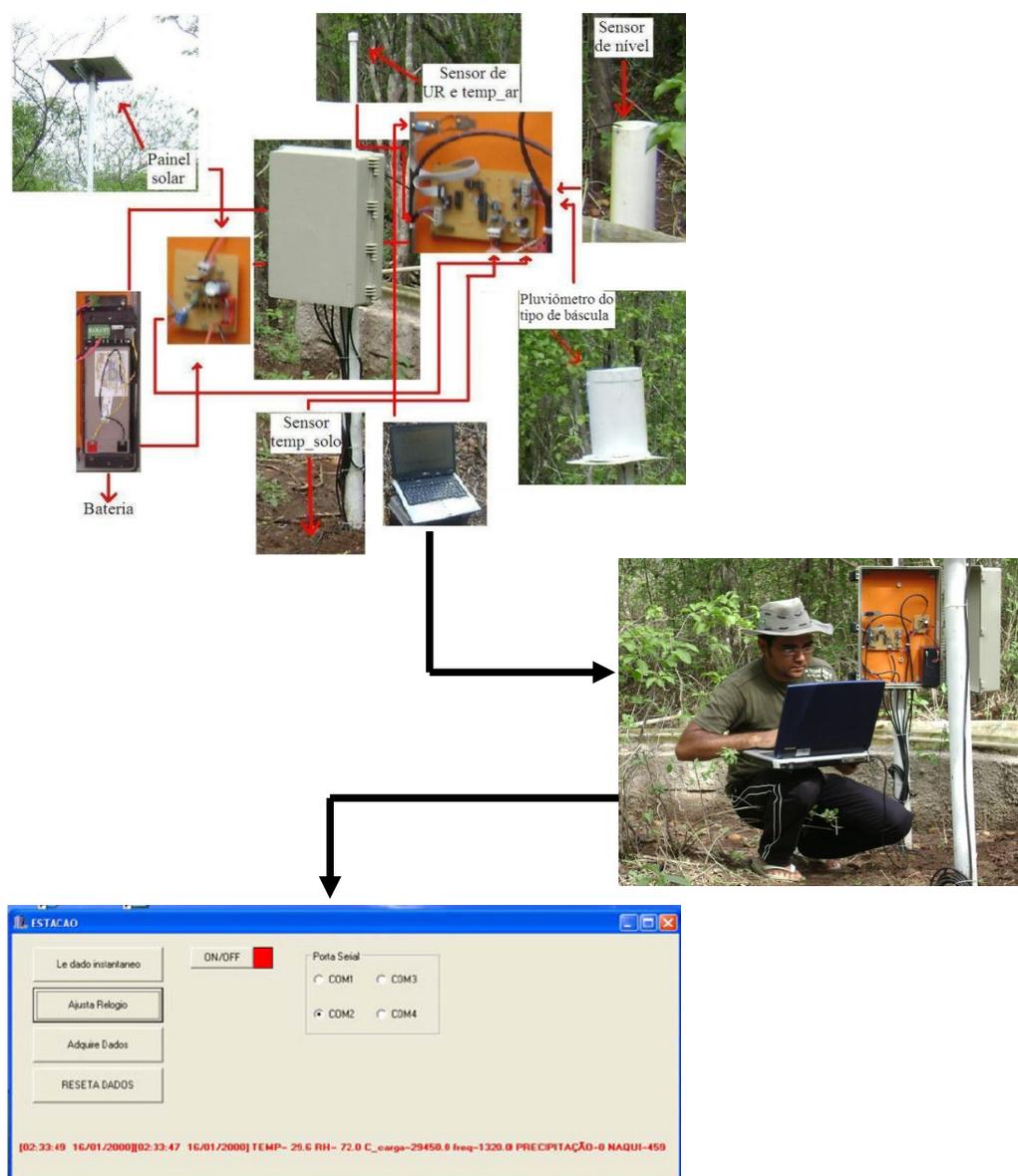


Figura 19 - Esquema de aquisição de dados na estação hidro-meteorológica automática elaborada no LEMA, conforme Canafistula et al. (2008).

3.6 Produção de sedimentos

A implantação das estações sedimentológicas nas microbacias ocorreu em dezembro de 2007, sendo que a coleta de dados para análise da concentração de sedimentos nas microbacias teve início em 2008, porém a análise dos dados deste estudo foi conduzida somente para o ano de 2009. Inicialmente as estações estavam situadas a jusante da calha Parshall, entretanto, para o ano hidrológico de 2009, os coletores foram reinstalados a montante da calha com propósito de evitar possível influência na concentração de sedimentos devido às mudanças no escoamento promovido pelo estrangulamento da calha. (COSTA, 2007).

Cada estação foi composta por uma torre de coleta automática de sedimentos de ramo ascendente. Essa possui garrafas de 100 mL dispostas a cada 15 cm, no total de 12. A água foi coletada através de um tubo conectado às garrafas (Figura 20), sendo o ar liberado pelo sistema respirador (tubos transparentes) que possui contato com a atmosfera no topo da torre. Ocorreu, em algumas situações, o entupimento dos orifícios que dá acesso às garrafas, por insetos, culminando em perda de dados, sendo necessário, portanto, um monitoramento periódico nos coletores.



[a]



[b]

Figura 20 – Torre de coleta de sedimentos confeccionados no LEMA [a], disposição dos recipientes no equipamento [b].

As amostras foram coletadas logo após eventos geradores de escoamento superficial que atingissem um ponto de coleta na torre de sedimentos, as análises das concentrações de sólidos totais foram realizadas a posteriori no Laboratório de Água, Solos e Tecido Vegetal do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Iguatu-CE (IFCE-Campus de Iguatu). Essas seguiram metodologia descrita por Piveli e Kato (2005).

3.7 Curvas-chave e Erosividade

Em todas as microbacias monitoradas foram confeccionadas curvas-chave, correlacionando os valores de produção de sedimentos (ton ha^{-1}) para cada evento individual com pico de descarga (L s^{-1}) correspondentes. Para cada uma das microbacias foram realizadas análise de variância, com propósito de verificar o modelo de melhor ajuste da relação entre vazão e produção de sedimentos. Com os modelos gerados a produção de sedimentos foi estimada, sendo a diferença entre os valores medidos e estimados avaliados de acordo com a relação abaixo. (HOROWITZ, 2003).

$$\%d = \frac{(SY_{\text{est}} - SY)}{SY} * 100 \dots\dots\dots (7)$$

Em que:

%d – representa o desvio percentual entre a produção de sedimentos medida e estimada (%)

SY – Produção de sedimentos medida (ton ha^{-1})

SY_{est} – Produção de sedimentos estimada (ton ha^{-1})

Para cada evento gerador de escoamento superficial, determinaram-se parâmetros como máxima intensidade em 30 minutos (I_{30}), dias sem escoamento anterior ao próximo evento chuva-deflúvio, tempo de precipitação, tempo de descarga, lâmina escoada, volume escoado, coeficiente de escoamento, pico de descarga e produção de sedimentos. Como forma de avaliar a produção de sedimentos calcularam-se também valores de erosividade, sendo este considerado bom estimador das perdas de solos em diversos trabalhos conduzidos no Brasil.

(ALBUQUERQUE et al., 2005). Dessa forma, a erosividade da precipitação (EI_{30}) foi estimada como:

$$EI_{30} = \sum Ec * I_{30} \dots\dots\dots (8)$$

Em que: Ec = energia cinética de precipitação por unidade de área ($MJ ha^{-1}$); e I_{30} = intensidade máxima de precipitação em meia hora ($mm h^{-1}$). Maiores informações sobre os processos de cálculo envolvendo a estimativa da energia cinética, podem ser encontrados em Haan; Barfield; Hayes, (1993).

Foram utilizados métodos estatísticos descritivas e regressão linear para explicar as respostas hidrológicas e distinção no padrão de escoamento nas diferentes unidades de monitoramento. (MILTON, 1992). O processamento eletrônico foi conduzido empregando-se o software estatístico SPSS (*Statistical Package for Social Sciences*) versão 16.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Características de infiltração e umidade do solo nas microbacias

O comportamento da condutividade hidráulica saturada do solo medida em condições de campo é uma característica de suma importância na compreensão do movimento de água no solo e na avaliação dos processos hidrossedimentológicos em bacias. Constatam-se baixos valores de condutividade hidráulica saturada em todas as unidades experimentais, sendo os menores valores evidenciados em B1, B2 e B3, com pouca diferenciação entre elas, conferindo a essas uma baixa capacidade de percolação de água para as camadas inferiores (Tabela 9). Para estas microbacias, os resultados encontrados são compatíveis com os apresentados por Chow, Maidment e Mays (1988) para solos com granulometria argilosa, cujo valor limiar superior é de $0,3 \text{ mm h}^{-1}$. Destaque-se que, embora os resultados sejam semelhantes, mesmo tendo as microbacias apresentado granulometria Franco a Franco-argilosa, a percolação de água não pode ser explicada somente pela K_{sat} , sendo necessários parâmetros como: estrutura, tipo de argila, presença de mica e arranjo espacial de poros do solo. Para a microbacia B3 não foi verificada diferenciação em K_{sat} entre as camadas.

Há uma tendência de menor K_{sat} para a camada superficial. Essa diferenciação é mais evidente em B4, com uma mudança brusca entre as camadas de 0-30 e 30-60 cm, sendo o maior valor na superfície do solo. Esse decréscimo abrupto na condutividade de B4, atingindo um valor 15 vezes menor na camada inferior, foi o principal responsável pela redução nos picos de descarga, e presença marcante de escoamento subsuperficial nessa microbacia. Ziegler et al. (2006), discutindo sobre a redução abrupta da condutividade hidráulica saturada do solo a uma profundidade de 0,5 m em uma bacia experimental na Malásia, concluíram que a redução possibilitou a elevação freática, com influência sobre o escoamento superficial da bacia. Sondagens de campo sobre todas as microbacias através de tradagens apontaram para uma camada mais arenosa na camada superficial em B4 (Tabela 6), sendo essa camada situada sobre uma outra com textura mais pesada, convergindo para o comportamento de condutividade hidráulica verificado na Tabela 9. Essa estratificação no perfil permite que a água se infiltre mais rapidamente na camada superficial e, ao encontrar outra de baixa condutividade hidráulica o fluxo vertical torna-se reduzido contribuindo para o escoamento subsuperficial e superficial por saturação.

Tabela 9 – Condutividade hidráulica saturada para as unidades experimentais B1, B2, B3 e B4

Local	Profundidade (cm)	
	0-30	30-60
	Condutividade hidráulica saturada - K_{sat} ($mm\ h^{-1}$)	
B1	0,06	0,15
B2	0,20	nda
B3	0,22	0,22
B4	6,50	0,44

nda – Dado não disponível

Os resultados das análises de densidade de solo, macroporosidade e porosidade total revelaram pouca ou nenhuma diferença estatística entre as quatro microbacias (Tabela 10), não sendo verificada também diferenciação entre as camadas avaliadas em uma mesma bacia. No entanto, verificou-se distinção estatística na avaliação do parâmetro microporosidade e são nestes poros onde fica retida a maior parte da água armazenada no solo devido à dificuldade de drenagem. A distinção deste parâmetro foi pequena entre as microbacias B1, B2 e B3, sendo o volume de microporos ligeiramente maior para a unidade de monitoramento B2 seguido da microbacia B3. Estes tipos de poros estão em menor quantidade em B4, com percentual de 28,8% na camada de 5-10 cm. Essa menor proporção está associada a maior proporção de estruturas esferoidais (areia), reduzindo dessa forma os espaços que seriam ocupados por esses poros. De acordo com Silva et al. (2005), a granulometria e a constituição do solo influenciam na retenção de água no solo, pois a adsorção depende basicamente do filme de água que recobre as partículas. Dessa forma, a retenção de água torna-se menor em solos com maior proporção de areia. O incremento do volume de microporos no solo pode levar a um aumento do conteúdo de água no solo das microbacias, contribuindo para elevação das taxas de escoamento superficial. No entanto, destaca-se que, para uma melhor interpretação desses resultados torna-se necessária uma análise conjunta desses parâmetros com a estrutura do solo e principalmente com a mineralogia. (LADO; BEN-HUR, 2004).

Tabela 10 – Densidade do solo (D_s), micro (M_I) e microporosidade (M_A) e porosidade total (P_T), dos solos das microbacias avaliadas

Parâmetros	Prof. (cm)	Microbacias			
		B1	B2	B3	B4
D_s ($g\ cm^{-3}$)	5	1,65A	1,29A	1,37A	1,61A
	15	1,38A	1,50A	1,59A	1,67A
M_I (%)	5	40,03B	46,04A	41,99B	35,03C
	15	36,72B	50,88A	47,37A	28,96C
M_A (%)	5	12,58A	12,48A	14,21A	12,18A
	15	11,55A	7,14A	10,73A	9,30A
P_T (%)	5	52,61AB	58,52A	56,20A	47,21B
	15	48,27A	58,01A	58,10A	38,26B

Médias seguidas por letras maiúsculas iguais nas linhas, não diferem estatisticamente entre si pelo teste Tukey em nível de 5% de probabilidade

Como forma de conhecimento da água retida no solo das microbacias, periodicamente, análises de umidade do solo pelo método gravimétrico foram conduzidas, e os resultados apresentados na Figura 21. A umidade do solo quando analisada de forma comparada, fornece um direcionamento sobre o poder de retenção de água de cada uma das microbacias. Pela figura supracitada percebe-se que todas as microbacias seguiram um mesmo padrão de ascensão e queda da umidade do solo como consequência natural do aporte de água no solo pela precipitação pluviométrica. A diferença encontra-se principalmente no potencial de armazenamento de água de cada uma delas, que repercute diretamente sobre os processos chuva-deflúvio.

As microbacias B1, B2 e B3 mostraram, da mesma forma que a condutividade hidráulica, um comportamento similar, com a umidade em B3 ligeiramente inferior a B1 e a B2, tendo estas duas últimas um maior potencial de armazenamento de água no solo. Por outro lado B4, mesmo com solo encharcado, com umidade superior à capacidade de campo, conforme observações da coleta do dia 29/04, atingiu valor de umidade 62% inferior a B2, confirmando a limitada capacidade de retenção de água, conferida pela presença marcante de areia na camada superficial. Pelos dados disponíveis, observa-se que o maior valor registrado de umidade ocorreu no dia 29/04 em todas as microbacias, com percentuais de 27,2; 27,5; 22 e 17% para as microbacias B1, B2, B3 e B4, respectivamente. Torna-se importante comentar que nos cinco dias anteriores a 29/04 ocorreram registro de precipitação, portanto, o maior

valor de umidade evidenciado neste dia foi consequência dessa série de eventos consecutivos que, juntos, proporcionaram um acumulado de aproximadamente 117 mm. Dessa forma, em média, o potencial de armazenamento de água é dada pela seguinte sequência: $B1 \cong B2 > B3 > B4$.

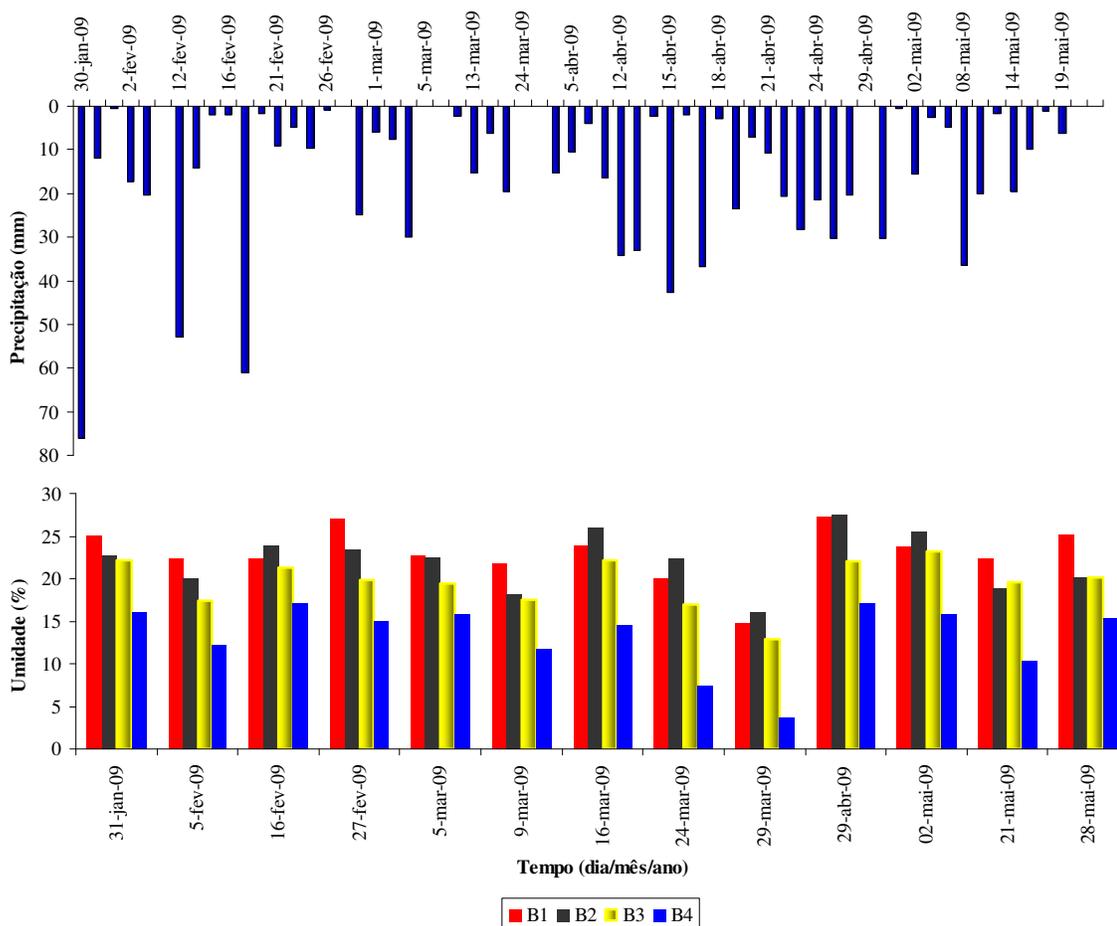


Figura 21 – Umidade do solo coletada na profundidade de 20 cm nas microbasias B1, B2, B3 e B4 para o ano de 2009.

4.2 Processos chuva-deflúvio nas microbasias monitoradas

4.2.1 Respostas hidrológicas em B1

Para avaliação dos processos chuva-deflúvio nas microbasias, foi conduzida uma análise de parâmetros hidrológicos, utilizando uma avaliação em escala temporal por evento.

Para análise desse estudo considerou-se como evento chuva-deflúvio todas as precipitações que produziram respostas nas microbacias em termos de geração e produção de vazão na seção de controle. Devido à pequena dimensão das unidades avaliadas, considerou-se como novo evento, quando não houve escoamento nas 12 h anteriores e quando a vazão máxima foi maior que $0,5 \text{ L s}^{-1}$, valor esse atribuído devido à sensibilidade mínima sensor empregado. . Bartley et al., 2006, consideraram valor de 1 L s^{-1} , em uma microbacia de 11 Km^2 , no semiárido australiano..

Os valores da precipitação (PPt), lâmina escoada (LE), vazão máxima observada (Q_{\max}), coeficiente de escoamento superficial (C) e intensidade máxima em 30 minutos (I_{30}) na microbacia B1 para o ano de 2009 estão presentes na Tabela 11. Constatou-se uma elevada variabilidade dos parâmetros. A vazão máxima diária variou de $0,5 \text{ L s}^{-1}$ para o evento do dia 13/02 e $115,81 \text{ L s}^{-1}$ no evento do dia 18/02, sendo que apenas o total precipitado não apresenta elementos suficientes para explicar essa variação. Analisando-se o total precipitado para os eventos de 12/02 e 18/02 observa-se que a diferença entre as duas alturas precipitadas foi de apenas 3,83 mm, evidenciando a inferências de outros parâmetros envolvidos no processo.

Dois fatores merecem destaque na explicativa das alterações da vazão máxima, os quais são: a distribuição temporal do evento e as condições de umidade antecedente. O evento com escoamento anterior ao do dia 12/02/09, ocorreu no dia 04/02 com uma lâmina precipitada de 15 mm, portanto, um intervalo de oito dias entre os eventos. Acredita-se que este intervalo de tempo tenha sido notável na redução da água armazenada no solo, justificando o baixo valor de vazão de pico para o evento 12/02. Por outro lado, o evento do dia 18/02, devido à magnitude dos eventos anteriores (12 e 13/02), e ao tipo de argila de seu solo, que confere a essa unidade uma alta capacidade em reter água nas camadas superficiais e subsuperficiais, teve influência no expressivo valor de vazão de pico do dia 18/02/09.

Tal fato demonstra a importância do armazenamento de água no solo nessa microbacia, sendo conferido pelas condições de precipitação antecedente. (IROUMÉ; MAYER; HUBER, 2006). Além disso, a própria intensidade do evento com I_{30} alcançando um valor de $61,72 \text{ mm h}^{-1}$ (Tabela 11), teve também participação na geração do escoamento deste evento.

Tabela 11 – Características hidrológicas da microbacia B1 para o ano de 2009: precipitação (Ppt), duração da precipitação, vazão de pico (Q_{\max}), lâmina escoada (LE), coeficiente de runoff (C), volume escoado (V) e intensidade máxima para intervalos de 30 minutos (I_{30})

Microbacia 1 (B1)							
Evento	Ppt (mm)	Duração (h)	Q_{\max} (L s ⁻¹)	LE (mm)	C (%)	V (m ³)	I_{30} (mm h ⁻¹)
30/01/09	76,50	3,25	19,74	3,12	4	35,82	62,22
02/02/09	16,32	0,67	0,60	0,20	1	2,27	30,10
04/02/09	15,55	1,00	0,59	0,16	1	1,87	26,01
12/02/09	43,60	3,17	1,13	0,57	1	6,58	40,29
13/02/09	10,71	1,08	0,50	0,13	1	1,15	12,24
18/02/09	47,43	2,75	115,81	10,69	23	122,87	61,72
28/02/09	18,87	1,25	0,79	0,19	1	2,13	21,42
04/03/09	26,01	2,42	38,92	4,75	18	54,57	29,58
18/03/09	42,42*	3,75	27,33	3,22	8	37,05	29,49
15/04/09	49,27*	5,00	26,33	3,95	8	45,39	38,10
17/04/09	39,87*	2,25	77,86	8,07	20	92,75	49,27
19/04/09	28,44*	1,00	6,80	1,96	7	22,52	32,51
20/04/09	13,71*	2,25	3,08	0,44	3	5,04	15,74
22 e 23/04	45,2*	7,17	4,92	4,40	10	50,58	20,80
24/04/09	23,36*	2,42	15,49	4,42	19	50,80	19,81
25/04/09	24,89*	2,67	11,43	4,32	17	49,69	26,41
28/04/09	19,05*	1,25	7,90	2,63	14	30,22	26,92
30/04/09	29,21*	0,75	90,94	9,92	34	113,98	55,88
01/05/09	14,98*	1,17	4,21	1,24	8	14,25	11,17
08/05/09	22,86*	1,92	42,90	5,27	23	60,52	36,57
09/05/09	8,63*	0,58	3,31	0,48	6	5,47	16,25
10/05/09	12,91*	2,75	3,07	1,21	9	13,92	8,63
13/05/09	20,06*	0,83	25,76	1,90	9	21,85	36,06
15/05/09	10,92*	1,17	1,58	0,38	3	4,32	15,24
média		2,18	22,12	3,07	10,35	35,23	29,79
D.P.		0,02	0,31	0,03	0,09	0,35	0,15

*Dados extraídos do pluviógrafo da microbacia B4

D.P. – Desvio Padrão

Verificaram-se, para essa microbacia, grandes oscilações na lâmina escoada entre eventos, sendo a variabilidade de alta complexidade. Provavelmente associada, primeiro a forma de análise que foi conduzida sobre eventos individuais e segundo ao tamanho da microbacia avaliada (1,1 ha). Por tratar-se de uma bacia de pequena escala, em que se aplicou um tratamento de remoção de parte da cobertura vegetação, as respostas podem mostrar-se com grande variação (GARGUR et al., 2003). Para o ano de 2009, a lâmina total escoada nesta unidade foi de 73,6 mm que corresponde a apenas 7,6% da precipitação deste ano.

A grande variação no escoamento superficial observado demonstra a importância no estudo de outros parâmetros associados à precipitação, como duração e principalmente

intensidade, e não apenas a lâmina total precipitada. Acredita-se também na influência da umidade antecedente do solo ao evento que gerou o escoamento, sobre aumento ou redução da lâmina escoada. Constatou-se que mesmo para grandes eventos de precipitação pluviométrica, como o evento do dia 30/01 (76,5 mm), o escoamento gerado foi de apenas 3,12 mm, ao passo que o evento do dia 18/02 (47,43 mm) a lâmina escoada foi de 10,69 mm, com coeficiente de runoff de 23%, demonstrando o papel de eventos anteriores em impulsionar a geração de escoamento.

Analisando o coeficiente de escoamento dessa microbacia observa-se também alta variação de evento para evento, sendo o valor de 1% observado para cinco eventos ocorridos em 2, 4, 12, 13 e 28/02/09, e o maior valor para o evento do dia 30/04, atingindo um valor de 34%, ou seja, dos 29,2 mm precipitados sobre a bacia 9,9 mm escoaram e atingiram o exutório. Acredita-se que essa magnitude seja decorrente dos eventos ocorridos entre os dias 17 e 30/04, responsáveis pela elevação da umidade do solo (Figura 21). Cánton et al. (2001) estudando uma microbacia vegetada em condições de região semi-árida na Espanha, com características de alta infiltração, encontraram coeficientes de runoff variando de 0,01 a 15%, com valor médio de apenas 3,86%, inferiores ao do presente estudo. Já Ruiz-Garcia et al. (2008), verificaram em uma microbacia cultivada, com uma cobertura vegetal de apenas 20%, coeficientes de escoamento próximos a 70%.

Mesmo em se tratando de uma bacia raleada (Figura 22) observaram-se, de maneira geral, valores de escoamento superficial considerados baixos, registrando, com exceção do evento do dia 30/04, valores não superiores a 23%. Pelo tipo de tratamento aplicado, a expectativa era de que os valores de escoamento fossem superiores aos evidenciados, essa magnitude de valores pode estar associada à elevada capacidade de abstração de água do solo encontrado na bacia. Aparentemente, a própria condição de vegetação remanescente após o tratamento, bem como as características hidráulicas da bacia podem ter contribuído de forma substancial na modificação das respostas hidrológicas. Isso se torna possível quando se analisam bacias de pequena escala, conforme averiguações de Garfur et al. (2003). Estes autores encontraram também baixos valores de coeficiente de runoff em uma microbacia de tamanho similar ao do presente estudo, que tiveram suas características também modificadas pelo tratamento de remoção da vegetação e queima, em que o coeficiente anual de runoff encontrado foi de 25%.



Figura 22 – Microbacia hidrográfica B1 após remoção parcial da vegetação pelo tratamento raleamento (novembro 2008).

As representações das relações entre precipitação e vazão, intensidade máxima em 30 minutos e vazão para o ano de 2009 na microbacia experimental B1 estão apresentadas nas Figuras 23 e 24, respectivamente. As variáveis precipitação e intensidade pluviométrica são empregadas em estudos dos processos chuva-deflúvio em bacias hidrográficas, que agem em conjunto com outros parâmetros, buscando compreender variações do pico de descarga. Observa-se pelo coeficiente de determinação (R^2) das figuras, baixa correlação individual entre precipitação e descarga ($F=4,8$), refletindo a alta variabilidade entre as variáveis, e apenas moderada correlação (MILTON, 1992) entre intensidade e pico de descarga para bacia a B1, reforçando a premissa do envolvimento de outros parâmetros em explicar as variações de vazão, sugerindo tratar-se de um processo multivariado. De fato, o processo chuva-deflúvio é bastante complexo, e métodos simples de correlação entre parâmetros óbvios não fornecem resultados satisfatórios, apesar de indicações claras de tendências e influências qualitativas. (SRINIVASAN; SANTOS; GALVÃO, 2003). Entre os dois parâmetros: altura e intensidade pluviométrica, a intensidade apresentou maior correlação com a vazão do que a precipitação, sendo significativa ao nível de 1% de probabilidade pelo teste F (49,01). Isso ocorre principalmente devido às características do clima da região, formado por chuvas convectivas com curta duração e alta intensidade (RODRIGUES et al., 2008), favorável à elevação das descargas máximas. Alencar, Silva e Oliveira (2006), avaliando influência da precipitação sobre o deflúvio em uma microbacia no Distrito Federal, apontam a necessidade de uma análise conjunta de parâmetros hidrológicos para explicar e quantificar o deflúvio. O monitoramento da precipitação e do deflúvio são ferramentas importantes para explicar a

quantidade e a qualidade do recurso água, e de grande complexidade em regiões semiáridas devido à variabilidade climática e também às constantes mudanças na cobertura vegetal decorrente do uso da terra. (GARCIA-RUIZ et al., 2008).

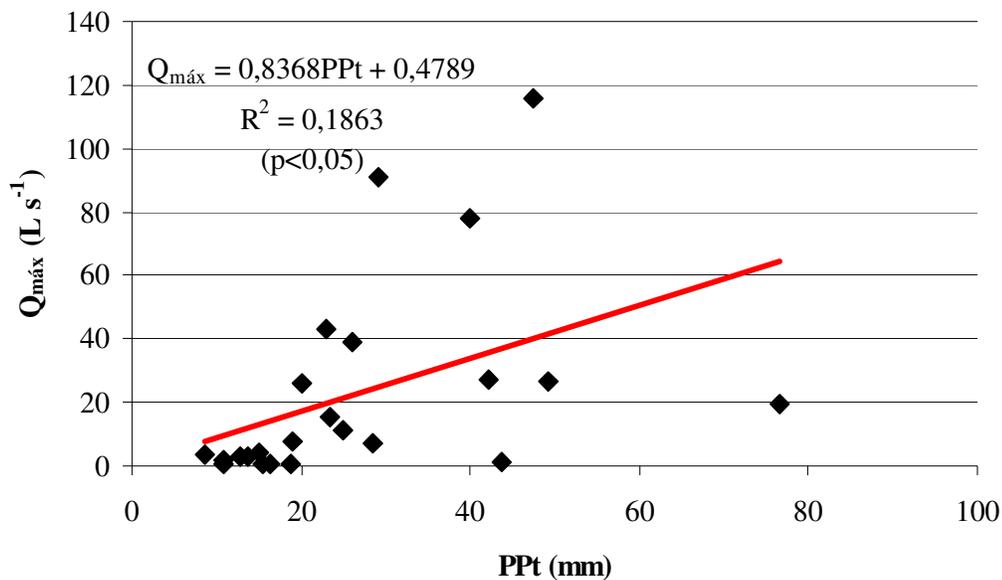


Figura 23 – Relação entre pico de descarga por evento e a correspondente precipitação pluviométrica no ano de 2009 para a microbacia B1.

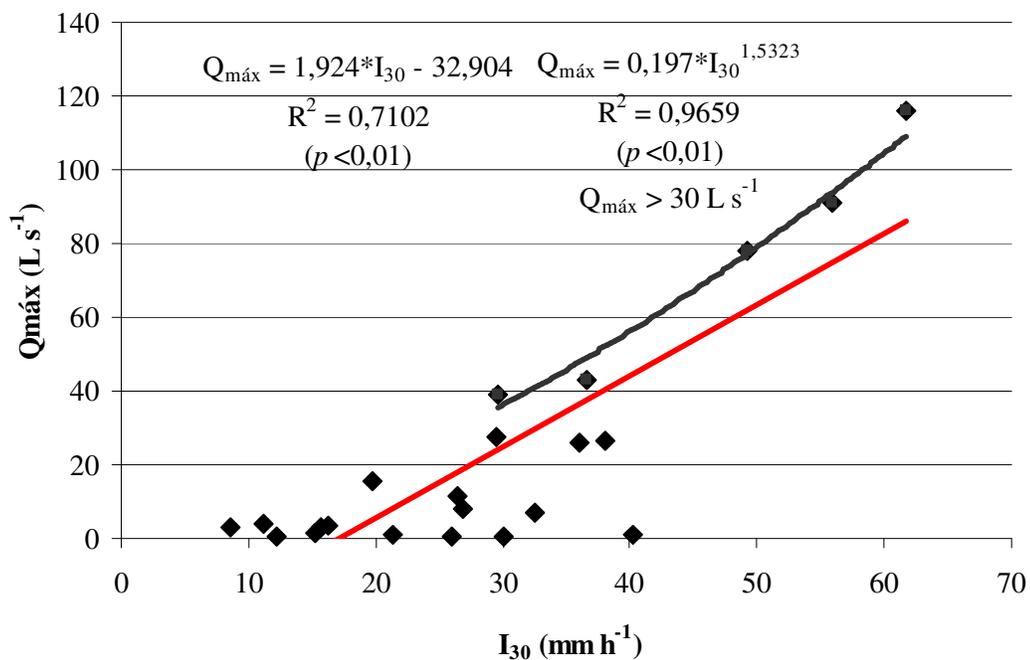


Figura 24 – Relação entre pico de descarga por evento e a correspondente intensidade máxima em 30 minutos no ano de 2009 para a microbacia B1.

4.2.2 Respostas hidrológicas em B2

Como forma de verificar e confirmar algumas respostas hidrológicas ocorridas em 2009 foi conduzida também uma análise para o ano de 2008 na microbacia B2. A investigação somente sobre esta unidade ocorreu devido à disponibilidade de dados apenas sobre esta no ano de 2008. Na Figura 25 observa-se o hietograma da microbacia B2 para eventos individuais durante a estação chuvosa no ano de 2008, no qual se verifica uma maior concentração de chuva para o mês de março, tendo eventos registrado valores superiores a 120 mm. As barras amarelas expressam a fração da precipitação convertida em escoamento (precipitação efetiva) representando portanto, os eventos que apresentaram escoamentos superficiais, dando uma idéia da temporalização dos eventos anteriores aos geradores de escoamento. O total de precipitação acumulado foi de 654,89 mm até o dia 9 de abril, sendo que apenas três eventos foram responsáveis 40% do total precipitado. É importante ressaltar que houve, para este ano, outros eventos de grande magnitude que produziram escoamento superficial, mas que por falhas no linígrafo não foram registrados e, portanto, não estão explicitados nessa síntese.

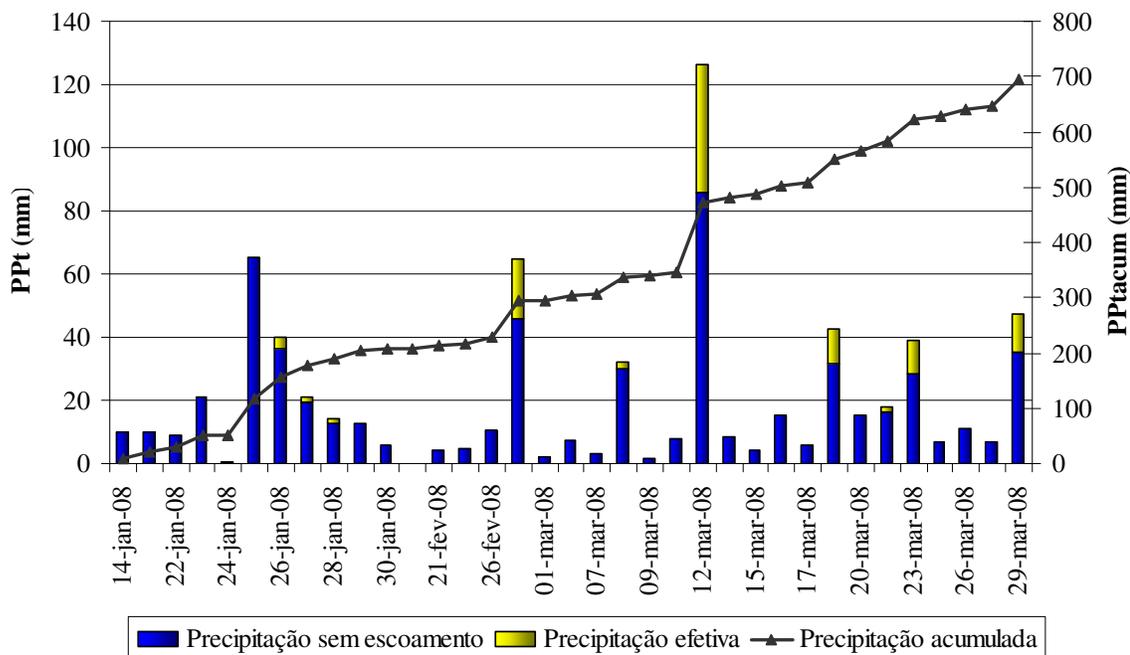


Figura 25 – Distribuição da precipitação pluviométrica e dos eventos geradores de escoamento superficial na microbacia B2 para o ano de 2008.

A descrição dos eventos geradores de runoff para o ano de 2008 na microbacia B2 é mostrada na Tabela 12. A vazão máxima ocorreu no evento do dia 12 de março, atingindo $205,39 \text{ L s}^{-1}$, promovendo uma lâmina escoada sobre a referida bacia de 40 mm. Destaca-se que o último evento com escoamento anterior a este, havia ocorrido no dia 8 de março, com um total precipitado de 31,87 mm (Figura 25). Por tratar-se de uma microbacia dentro de uma mancha de solo franco-argilosa (Tabela 4), com baixo valor de condutividade hidráulica, a grande lâmina escoada para o evento do dia 12/03/08 foi impulsionada pelos altos valores de intensidade deste evento, com I_{30} atingindo valor de 101 mm h^{-1} , e com I_5 (intensidade máxima em 5 minutos) alcançando magnitude de 146 mm h^{-1} . Tal fato expressa uma característica marcante do clima da região, marcado por altos valores de intensidade pluviométrica. (ALVES, 2008). O valor de intensidade máxima para 30 minutos é compatível com os observados por Rodrigues et al. (2008) para um período de retorno de 25 anos no município de Pentecoste-CE, localidade com clima similar ao do presente estudo.

Tabela 12 – Características hidrológicas da microbacia B2 para o ano de 2008: precipitação (PPt), duração da precipitação, vazão de pico, lâmina escoada (LE), coeficiente de runoff (C), volume escoado (V) e intensidade máxima para intervalos de 30 minutos (I_{30})

Microbacia 2 (B2)							
Evento	PPt (mm)	Duração (h)	Q_{\max} (L s^{-1})	LE (mm)	C (%)	V (m^3)	I_{30} (mm h^{-1})
26/01/08	39,74	2,16	17,85	3,51	9	72,26	49,47
27/01/08	20,91	2,08	7,52	1,52	7	31,25	16,83
28/01/08	14,03	1,50	4,01	1,43	10	29,47	19,89
27/02/08	64,78	5,58	113,71	19,01	29	393,22	69,89
08/03/08	31,87	2,83	11,25	2,07	7	42,74	39,27
12/03/08	124,20	5,08	205,79	40,26	32	829,44	101,52
19/03/08	42,59	2,16	80,68	10,83	25	223,20	57,12
23/03/08	18,10	1,33	14,15	1,53	8	31,68	26,52
23/03/08	38,79	4,66	35,06	10,39	27	214,13	23,97
30/03/08	47,28	3,75	132,33	12,10	25	249,31	42,33
média		3,11	62,24	10,27	18	211,67	44,68
D.P		0,02	0,69	0,12	0,10	2,50	0,26

Dependendo das condições de umidade antecedente no solo, mesmo pequenas lâminas de precipitação são capazes de impulsionar escoamento superficial sobre essa microbacia, conforme constatação do coeficiente de escoamento do dia 28/01/08. Neste evento de apenas 14 mm de chuva, 10% destes foram convertidos em escoamento, sendo a abstração inicial muito pequena nessa situação, já que o solo encontrava-se com baixo poder de retenção de água, em condição próxima à de saturação como decorrência natural dos

eventos anteriores (26 e 27/01) (Tabela 12). Além dos eventos dos dias 26 e 27/01, que juntos corresponderam a uma altura precipitada de 60,65 mm, ocorreu ainda o evento de 25/01, com um total precipitado de 65,28 mm, que não apresentou escoamento superficial, como mostra a Figura 25, mas que foi fundamental para promover escoamento dos dias posteriores.

Em uma outra análise, conforme evidência dos eventos que apresentaram escoamento no ano de 2008, constata-se que seja necessário, para essa microbacia, devido às suas condições de solo e vegetação, que haja ao menos um evento anterior de alta magnitude, como o registrado para o dia 25/01 e/ou eventos sucessivos de menor lâmina, para impulsionar o escoamento. Embora o evento (25/01/08) tenha apresentado um total acumulado de 65,3 mm com intensidade máxima em 30 minutos (I_{30}) de 55,59 mm h⁻¹, superior ao I_{30} de 62,5% de todos os eventos que geraram escoamento em 2008 (Tabela 12), o mesmo não gerou escoamento superficial. O I_5 (intensidade máxima em 5 minutos) deste evento atingiu valores de 85,68 mm h⁻¹, sendo altas intensidades também registradas em uma duração de pelo menos 20 minutos. Destaca-se ainda o registro de eventos de menor expressão não geradores de escoamento, anteriores ao do dia 25/01/08 que, somados a este, tiveram um acumulado de 124 mm. Considerando-se o baixo tempo de concentração da microbacia em avaliação (aproximadamente 5 minutos), e dadas as características do evento em análise, a expectativa seria de ocorrência de escoamento, o que não aconteceu. Antes dos primeiros eventos de chuvas que ocorrem geralmente no final de janeiro, a região passa por longos períodos de estiagem (julho/dezembro) e com alto potencial de evapotranspiração, necessitando de um grande aporte de água no solo para promover a saturação, demonstrando a influência de condições de pré-evento em impulsionar escoamento.

Constatou-se por averiguações “*in locu*”, e com base em ensaios de condutividade hidráulica saturada, a presença de escoamento superficial hortoniano e subsuperficial. Não se descarta também a possibilidade de outros tipos de escoamentos, como por saturação, haja vista que precipitação com valores baixos de intensidade de chuvas pode gerar escoamento, tendo dessa forma a necessidade de estudos posteriores para quantificação destes. Costa (2008) identificou predominância de escoamento superficial hortoniano na Bacia Experimental de Aiuaba (BEA), CE, sendo esta, caracterizada por uma formação sedimentar, com coeficientes de runoff de baixa magnitude, como consequência de elevadas perdas em trânsito. Cantón, et al. (2001) estudando microbacias de clima semiárido no sudeste espanhol verificaram domínio de escoamento hortoniano. Já Cebellos e Schnabel (1998) investigando o comportamento hidrológico sobre microbacias também na Espanha, identificaram, além do hortoniano, ocorrência considerável do escoamento por saturação.

A representação de um evento extremo é de grande importância para identificação e compreensão de processos que operam sobre uma microbacia, e modelos chuva-deflúvio devem tentar de forma aproximada reproduzir esses processos. A Figura 26 representa o hietograma e o hidrograma do evento registrado no dia 12 de maio de 2008, na unidade experimental B2. A hidrógrafa apresenta características de alta similaridade com o hietograma, mostrando uma tendência de fluxos rápidos, com uma súbita ascensão e um declínio íngreme, com características de escoamento hortoniano. (COSTA, 2007). Observa-se que, mesmo o evento de precipitação tendo tido início às 2:30 h, o primeiro registro de escoamento no exutório ocorreu 1:05 h depois, às 3:35 h, com um cômputo de vazão de 4 L s^{-1} . Cinco minutos depois, o hidrograma teve uma elevação rápida atingindo uma magnitude de $39,8 \text{ L s}^{-1}$. Para este evento foi necessário uma precipitação acumulada de aproximadamente 19 mm para o início do escoamento superficial. Considerando como baixo, o tempo necessário para o fluxo atingir o exutório como consequência da pequena dimensão da unidade avaliada, observou-se que, mesmo com grandes intensidades (I_5) como a constatada no intervalo de tempo entre 3:10 e 3:15 h, atingindo valores $48,9 \text{ mm h}^{-1}$, o escoamento não atingiu o exutório da bacia. Tal fato pode sugerir que nesse nível de escala I_{30} talvez seja um parâmetro melhor para explicar o processo e caracterização do escoamento que I_5 . Devido as características de precipitação da microbacia, pode haver altos valores isolados de intensidade que, por si só, não explica de forma satisfatória o mecanismo de escoamento. Observa-se ainda pelo hidrograma que o pico de descarga praticamente coincide com o pico de intensidade de chuva, com um atraso de aproximadamente 5 minutos, tempo este próximo àquele em que toda a bacia está contribuindo na seção de controle (tempo de concentração).

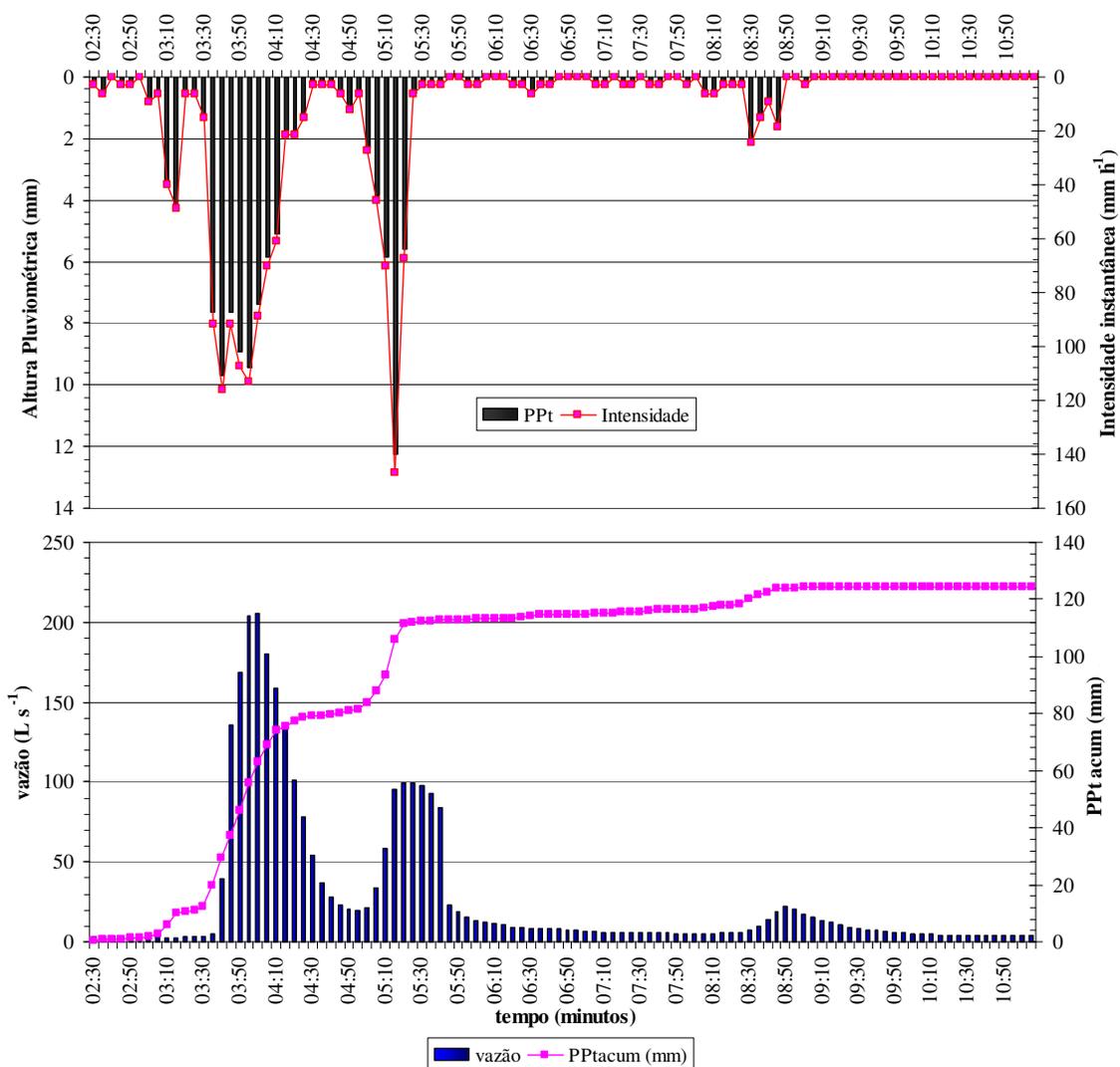


Figura 26 – Precipitação, intensidade e descarga para o evento do dia 12 março de 2008, na microbacia B2.

O hietograma da microbacia B2 para eventos individuais durante a estação chuvosa no ano de 2009 está mostrado na Figura 29, destacando que o hietograma supra citado é também representativo para microbacia B1. De maneira geral apenas os eventos maiores que 15 mm foram suficientes para geração de escoamento nesse ano, representados pelas barras amarelas, exceção feita aos anteriores ao dia 29/01, que apesar de não terem gerado escoamento, foram importantes no armazenamento de água no solo, e aos eventos dos dias 21/04 e 15/05, que registraram escoamento com precipitação inferior a 15 mm. Essa condição de geração de escoamento superficial com baixas lâminas precipitadas apenas é

possível em condição de alta umidade do solo promovida por uma sequência de eventos anteriores.

Os eventos que apresentaram escoamento foram importantes para explicar as respostas hidrológicas e perdas de solo nessa microbacia, conforme será explicado no decorrer desse estudo. Constatou-se forte irregularidade entre eventos e entre os meses, sendo a maior concentração de chuvas verificada para o mês de abril com um total acumulado de 392,5 mm, seguido do mês de fevereiro com uma altura pluviométrica de 221,2 mm, enquanto que, para os meses de janeiro e março, este total foi de 192,8 e 86,6 mm, respectivamente. Diferentemente do ano de 2008 e da média histórica da estação de Iguatu (Figura 6), que aponta o mês de março com maiores lâminas precipitadas, para o ano hidrológico de 2009, essas foram concentradas em abril e fevereiro, com 11 e 5 eventos chuva-deflúvio, respectivamente (Figura 27).

O mês de março, caracterizado pela maior concentração de chuvas da região, registrou apenas dois eventos chuva-deflúvio, sendo considerado um mês atípico, com um total acumulado (86,6 mm) superando apenas os totais precipitados em março para os anos de 1978, 82 e 96, de acordo com a série histórica. Apesar de tratar-se de um ano considerado com precipitações acima da média histórica, os eventos foram bem distribuídos, não sendo registrado nenhum deles com precipitação acima de 80 mm, diferente de 2008, com eventos atingindo 124,2 mm e intensidades superiores a 140 mm h^{-1} . Essa tendência de chuvas bem distribuídas em 2009 pode ter afetado as taxas de escoamento e perdas de solo na área de estudo. Thomaz (2009), verificou a forte influência de um ano de baixos valores precipitados sobre escoamento e produção de sedimentos na região Sul do Brasil devido às mudanças nas características do evento. A lâmina escoada neste ano foi de 104 mm, correspondendo a 10,8% da precipitação pluviométrica.

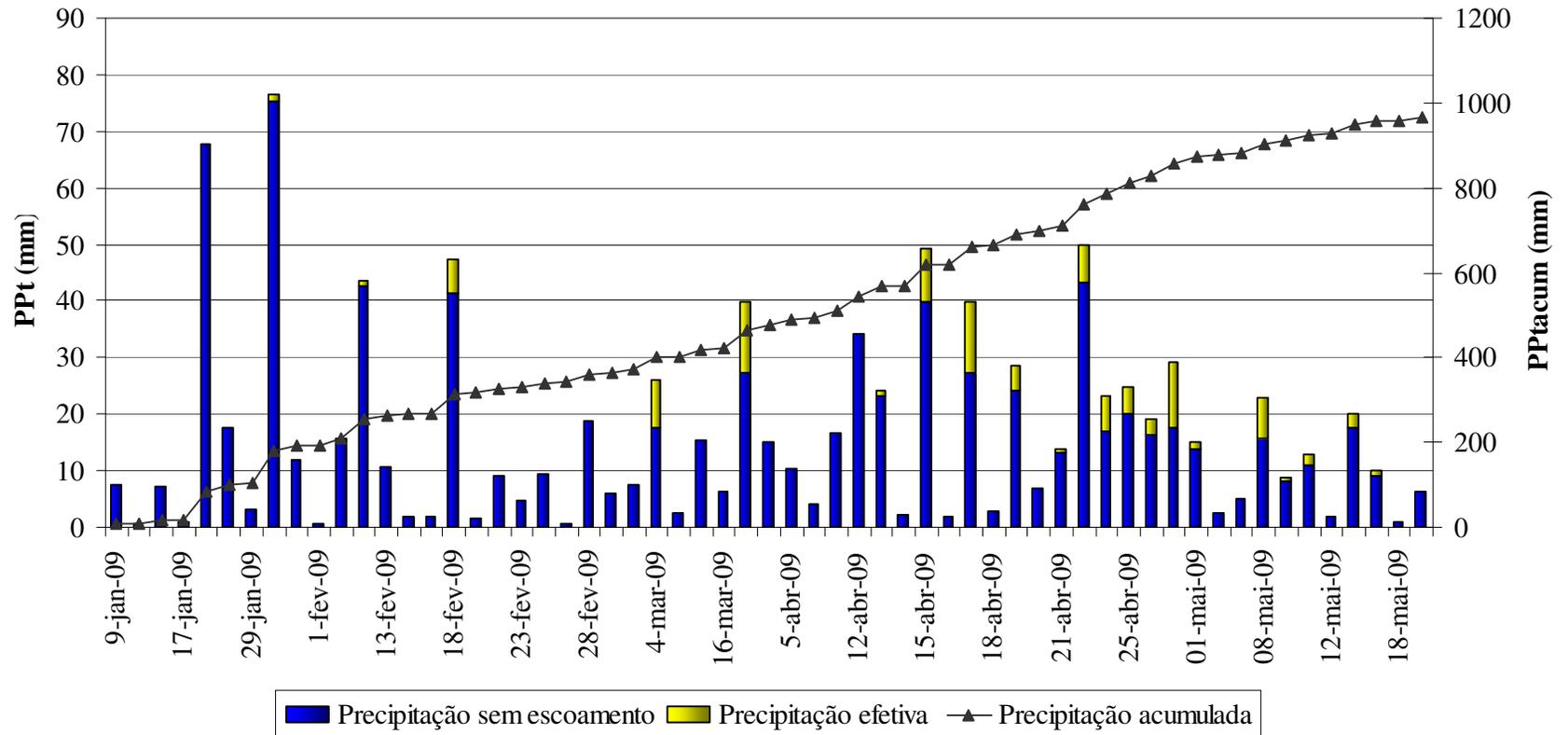


Figura 27 – Distribuição da precipitação pluviométrica e dos eventos geradores de escoamento de runoff na microbacia B2 para o ano de 2009.

Dada a proximidade entre as bacias avaliadas, cujas fronteiras de separação são apenas os divisores topográficos, os valores de precipitação pluviométrica registrados no pluviógrafo foram tomados como os mesmos para as microbacias B1 e B2. Para o ano de 2009, foram registrados dois eventos relevantes que incrementaram a umidade ao solo e iniciaram os processos de deflúvio nos eventos subsequentes, conforme dados pluviométricos de B2. Um deles ocorreu em 22/01/09, com precipitação total de 67,5 mm, e o outro no dia seguinte com valor de 17,7 mm (Figura 27). Devido às falhas no registro pluviográfico, as características destes eventos não puderam ser levantadas. Além destes, outros eventos de menor expressão influenciaram também no aporte de água ao solo que, somados, proporcionaram um acumulado de 109,9 mm antes do primeiro registro de escoamento superficial, que ocorreu em 30/01/09, situação bastante semelhante à do ano de 2008.

Para esse ano as vazões de pico na microbacia B2 apresentaram valores mínimos e máximos para os eventos dos dias 04/02 e 18/02, com fluxo de 0,5 a 168,1 L s⁻¹, respectivamente (Tabela 13). Da mesma forma que em B1, os resultados revelaram que uma análise unidirecional sobre os valores de precipitação não foram suficientes para explicar a variação do pico de descarga para eventos isolados para o ano de 2009, nem tampouco as intensidades médias em 30 minutos, conforme averiguações da Tabela 13. Pela análise dos eventos dos dias 30/01 e 18/2, por exemplo, nota-se que estes tiveram a mesma magnitude quanto à intensidade de chuva, com o primeiro alcançando um patamar de 62,22 mm h⁻¹ contra 61,71 mm h⁻¹ do segundo. No entanto, as respostas foram totalmente diferentes quanto à vazão de pico, sendo o pico de descarga do dia 18/02 aproximadamente dez vezes superior ao do dia 30/01, mesmo com um total precipitado inferior a 29 mm (Tabela 13). Tal resultado mostra claramente que os processos envolvidos na conversão de chuva em vazão nas regiões semiáridas não são simples, e envolve a interação de diferentes variáveis expressando o caráter multivariado dos processos naturais. Alencar, Silva e Oliveira (2006) estudando microbacias no Distrito Federal, discutem sobre a complexidade de se encontrar correlações significativas entre diferentes variáveis hidrológicas mesmo pelo emprego de regressão múltipla.

Tabela 13 – Características hidrológicas da microbacia B2 para o ano de 2009: precipitação (PPt), duração da precipitação, vazão de pico (Q_{\max}), lâmina escoada (LE), coeficiente de runoff (C), volume escoado (V) e intensidade máxima para intervalos de 30 minutos (I_{30})

Microbacia 2 (B2)							
Evento	PPt (mm)	Duração (h)	Q_{\max} ($L\ s^{-1}$)	LE (mm)	C (%)	V (m^3)	I_{30} ($mm\ h^{-1}$)
30/01/09	76,50	3,25	16,23	1,34	2	27,56	62,22
04/02/09	15,55	1,00	0,50	0,06	0,4	1,14	26,01
12/02/09	43,60	3,17	8,10	0,99	2	20,33	40,29
13/02/09	10,71	1,08	0,90	0,11	1	2,31	12,24
18/02/09	47,43	2,75	168,10	12,06	25	248,81	61,72
28/02/09	18,87	1,25	1,38	0,15	1	3,19	21,42
04/03/09	26,01	2,42	90,85	8,65	33	178,52	29,58
18/03/09	42,42*	3,75	76,21	6,05	14	124,90	29,46
12/04/09	34,29*	2,83	2,18	0,16	0,5	3,36	49,78
13/04/09	24,13*	3,00	7,46	1,06	4	21,96	18,79
15/04/09	49,27*	5,00	64,06	9,40	19	194,07	38,1
17/04/09	39,87*	2,25	139,65	12,56	32	259,27	49,27
19/04/09	28,44*	1,50	29,06	4,19	15	86,55	32,51
20/04/09	13,71*	2,25	2,26	0,55	4	11,45	15,74
22 e 23/04	50,00*	7,67	12,00	6,82	14	140,83	20,8
24/04/09	23,36*	2,50	41,93	6,51	28	134,34	19,81
25/04/09	24,89*	2,67	33,34	4,94	20	101,88	26,41
28/04/09	19,05*	1,25	25,38	2,82	15	58,24	26,92
30/04/09	29,21*	0,75	139,94	11,50	39	237,33	55,88
01/05/09	14,98*	1,17	12,15	1,10	7	22,35	11,17
08/05/09	22,86*	1,92	72,39	7,18	31	148,26	36,57
09/05/09	8,63*	0,58	4,08	0,56	7	11,61	16,25
10/05/09	12,91*	2,75	8,39	1,87	14	38,56	8,63
13/05/09	20,06*	0,83	46,35	2,56	13	52,75	36,06
15/05/09	10,92*	1,17	6,26	1,04	9	21,37	15,24
média		2,37	40,36	4,17	14	86,04	29,79
D.P.		0,02	0,49	0,04	0,12	0,85	0,15

*Dados extraídos do pluviógrafo da microbacia B4

Os coeficientes de escoamento para essa microbacia variaram entre 0,4 e 39% (Tabela 13). Pela averiguação cronológica dos eventos, observam-se baixos valores de escoamento (que pode ser visto pelas lâminas escoadas), para os primeiros eventos registrados. No início de ano hidrológico de 2009, mesmo para grandes eventos, como aqueles registrados nos dias 30/01 e 12/02, os coeficientes de escoamento superficial não ultrapassaram 2%, com lâmina escoada não superior a 2 mm sobre a microbacia B2. Por outro lado, para eventos de similar magnitude ou inferiores, como os ocorridos nos dias 18/02 e 04/03, o escoamento mostrou-se expressivo (lâmina superior a 8,5 mm). Acredita-se que tal fato relaciona-se ao poder de retenção de água do solo, conferido pelas características físico-

químicas do mesmo. Em condições de saturação do solo, o que é bastante comum depois de vários eventos, ou de eventos intercalados em curtos intervalos de tempo onde até mesmo pequenas lâminas precipitadas sobre a área são suficientes para promover a elevação do runoff. Tais considerações foram também verificadas por Alves (2008), para a mesma microbacia na estação chuvosa de 2008.

4.2.3 Respostas hidrológicas da B3

O padrão de distribuição dos eventos com geração de escoamento superficial na microbacia experimental B3 para o ano de 2009 está contido no hietograma da Figura 28. Verificou-se, pela distribuição dos eventos para este ano, que a maior parte deles representa eventos de baixas magnitudes, sendo que 56% dos eventos apresentaram alturas pluviométricas menores que 15 mm, 29% entre 15 e 30 mm, outros 8% estiveram entre 30 e 40 mm e apenas 8% foram maiores que 40 mm. A geração de escoamento superficial da mesma forma que em B2 apresenta elevada dependência do aporte de água dos eventos anteriores. Torna-se interessante observar que, em condições de alto teor de água no solo nessa microbacia, praticamente todos os eventos com altura pluviométrica superior a 10 mm, foram suficientes para geração de escoamento, conforme averiguações da série de um mês dos eventos compreendidos entre 12/04 a 15/05, em que todos os eventos proporcionaram escoamento (Figura 28).

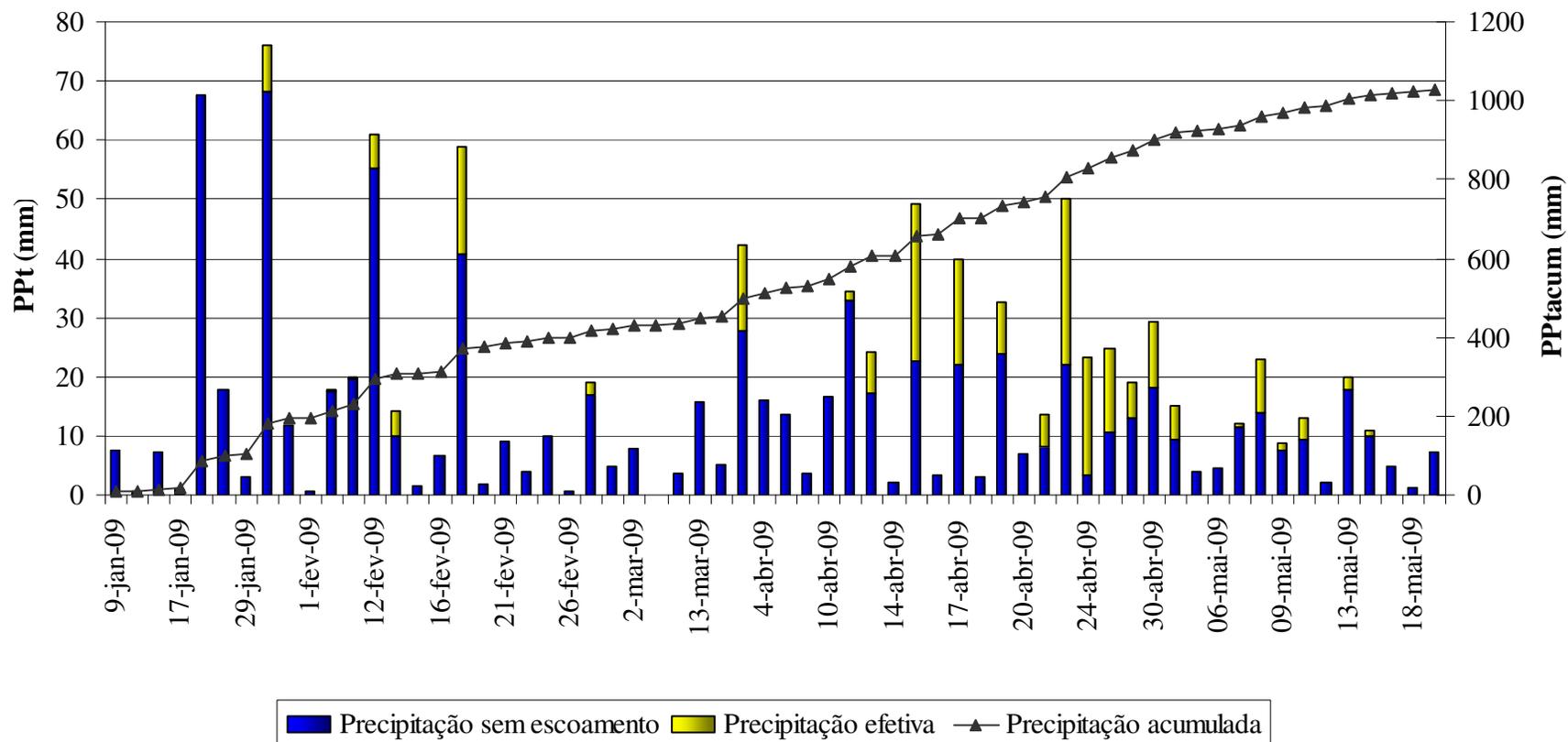


Figura 28 – Distribuição da precipitação pluviométrica e dos eventos geradores de escoamento de runoff na microbacia B3 para o ano de 2009.

Apesar de o ano de 2009 ter registrado precipitações bem distribuídas no tempo, grandes oscilações foram verificadas em todas as variáveis (Tabela 14). De todas as microbacias avaliadas, B3 foi a que mostrou maiores valores de lâmina escoada, do coeficiente de escoamento e do pico de descarga. O mês de abril apresentou a maior produção de escoamento superficial, sendo este responsável por 51% do escoamento gerado em 2009. Por outro lado, o mês de março, historicamente o mais chuvoso para a região em análise (Figura 6), contabilizou somente dois eventos; ficando um sem registro (04/03) devido à falha instrumental, e outro ocorrido em 18/03. A lâmina total anual escoada nessa microbacia foi de 222,5 mm que corresponde a 22% da precipitação total, com um pico de descarga variando de 1,1 a 117,7 L s⁻¹, e coeficiente de escoamento variando entre 2 e 86%. Avaliando os eventos de deflúvio dos dias 24 e 25/04/09, embora tenham apresentado uma mesma lâmina precipitada, para o dia 24/04 esta lâmina foi distribuída sobre dois eventos de precipitação, sendo um deles ocorrido entre 3:15 e 5:30 h, responsável pela saturação do solo e deflúvio (8:55 h), e um outro ocorrido entre 8:55 e 9:30 h sobre uma condição ainda com escoamento superficial, atuando na elevação da descarga máxima (Figura 41). Na microbacia B3, esta situação influenciou no aumento do volume escoado e elevação do coeficiente de escoamento.

Comparativamente às outras microbacias, B3 é a que apresenta maior densidade de cobertura vegetal. Portanto, apesar da importância dessa variável sobre as respostas hidrológicas, os resultados apontam para o fato de a vegetação não ser a principal componente envolvida nos altos valores de coeficiente de escoamento e pico de descarga nessa unidade de monitoramento. Mugabe, Hodnett e Senzanje (2007) estudando comportamento hidrológico de microbacias em região semi-árida em Zimbabwe-África comentam sobre o papel secundário da vegetação sobre as respostas hidrológicas na bacia experimental de Romwe.

Tabela 14 – Características hidrológicas da microbacia B3 para o ano de 2009: precipitação, duração da precipitação (PPt), vazão de pico (Q_{\max}), lâmina escoada (LE), coeficiente de runoff (C), volume escoado (V) e intensidade máxima para intervalos de 30 minutos (I_{30})

Microbacia 3 (B3)							
Evento	PPt (mm)	Duração (h)	Q_{\max} ($L\ s^{-1}$)	LE (mm)	C (%)	V (m^3)	I_{30} ($mm\ h^{-1}$)
30/01/09	76,50**	3,75	60,34	7,71	10	216,10	62,22
02/01/09	17,78	0,83	1,39	0,31	2	8,73	30,10
04/02/09	20,00	1,25	1,10	0,31	2	8,68	34,54
12/02/09	60,96	3,92	35,75	5,83	10	163,3	51,31
13/02/09	14,22	1,25	25,01	4,23	30	118,5	14,73
18/02/09	58,95	3,00	117,75	18,12	31	507,56	76,70
28/02/09	18,87**	2,00	9,91	1,87	10	52,32	21,42
18/03/09	42,41*	3,75	87,55	14,49	34	406,05	29,49
12/04/09	34,29*	2,92	1,71	1,50	4	42,11	49,78
13/04/09	24,13*	3,00	37,01	6,78	28	189,95	18,79
15/04/09	49,27*	5,00	69,96	26,60	54	745,26	38,10
17/04/09	39,87*	2,25	89,90	17,93	45	502,23	49,27
19/04/09	32,75*	3,50	42,35	8,97	31	298,2	32,51
20/04/09	13,71*	2,25	19,02	5,57	41	156,17	15,74
22 e 23/04	50,20*	7,17	28,67	28,03	56	783,10	20,8
24/04/09	23,36*	2,50	72,34	20,02	86	560,71	19,81
25/04/09	24,89*	2,67	45,04	14,31	57	400,81	26,41
28/04/09	19,05*	1,23	43,57	6,12	32	171,36	26,92
30/04/09	29,21*	0,75	90,81	11,06	38	309,78	55,88
01/05/09	14,98*	1,33	29,63	5,57	37	155,90	11,17
07/05/09	12,10*	1,17	3,82	0,50	4	13,92	13,20
08/05/09	22,86*	0,58	76,85	9,01	39	252,52	36,57
09/05/09	8,63*	1,92	12,03	1,08	12	30,13	16,25
10/05/09	12,91*	2,75	23,41	3,47	27	97,23	8,63
13/05/09	20,06*	0,83	26,39	2,26	11	63,28	36,06
15/05/09	10,92*	1,17	3,14	0,87	8	24,38	15,24
média		2,41	40,56	8,56	28,42	241,55	31,22
D.P.		0,02	0,33	0,08	0,21	2,26	0,17

*Dados extraídos do pluviógrafo da microbacia B4

**Dados extraídos do pluviógrafo da microbacia B1

Embora se tenha verificado forte influência da intensidade de precipitação pluviométrica sobre as repostas hidrológicas como pode ser averiguado nos eventos ocorridos nos dias 18/02 e 30/04, que produziram os maiores picos de descarga acompanhados dos maiores valores de intensidades (I_{30}). Para estes dois eventos observou-se que a umidade anterior do solo (condições de pré-evento) teve uma influência maior no comportamento hidrológico do que a intensidade, uma vez que, embora as intensidades tenham sido similares, a descarga máxima e escoamento superficial foram superior no evento do dia 30/04, com influências dos eventos anteriores. Sendo assim, as respostas ao escoamento foram dominadas

principalmente pelo conteúdo de água no solo. Analisando os eventos dos dias 12/04 e 17/04, verifica-se que embora os mesmos tendo alturas precipitadas semelhantes e idênticos valores de intensidade de chuva, as lâminas escoadas e o coeficiente de runoff dos dois eventos foram diferenciados entre si em um número superior a 10 vezes (Tabela 14), tornando evidente a maior influência da componente umidade anterior sobre o processo chuva-deflúvio nessa microbacia. Antes do evento dia 12/04, foi registrado um período de treze dias sem ocorrência de chuvas com geração de escoamento.

Já para o evento do dia 17/04 ocorreu, antes deste, uma série de eventos consecutivos com escoamento que diminuíram o potencial de armazenamento no solo, tornando a bacia mais susceptível ao escoamento e enchentes. O evento do dia 30/04, mesmo mostrando-se com uma altura pluviométrica 2,6 vezes menor que o maior evento do ano em termos de lâmina (30/01) teve um coeficiente de escoamento 3,8 vezes maior, embora tenha apresentado também intensidade inferior. Tal comportamento se explica também pelas condições de umidade do solo provido pelos eventos anteriores, aliado aos baixos valores de condutividade hidráulica até a profundidade de 60 cm (Tabela 9), facilitando o escoamento por eventos subsequentes. De fato, os maiores coeficientes de escoamento foram constatados em eventos antecedidos por outros que tiveram escoamento com curtos intervalos de tempo entre eles, conforme observações dos eventos compreendidos entre os dias 15/ e 30/04. Esses resultados confirmam as observações de Garcia-Ruiz et al. (2008) e Cánton et al. (2001) sobre o importante papel das condições de umidade antecedente do solo sobre as respostas hidrológicas nas bacias. Acredita-se também que o tipo de argila presente, bem como o caráter estrutural do solo nessa microbacia, tenha favorecido a retenção de água no solo, facilitando o escoamento. De acordo com levantamentos de solos locais (SUDEC, 1980), o relevo do município de Iguatu, onde se inserem as unidades de monitoramento, foi formado por um processo erosivo de solos com argilas 2:1, grupo montmorilonita. Lado e Ben-Hur (2004) afirmam que este grupo de argila, quando presente, apresenta características dispersivas com facilidade na formação de selamento do solo, favorecendo assim escoamento superficial. Dessa forma as respostas hidrológicas sofrem de início a influência da expansão da argila devido à precipitação anterior e selamento do solo.

4.2.4 Respostas hidrológicas em B4

A distribuição temporal dos eventos com escoamento na unidade experimental B4 na estação chuvosa de 2009 apresentou um padrão similar ao verificado na microbacia B2, sendo a unidade anterior uma variável de destaque em impulsionar o escoamento (Figura 29). Para este ano o hietograma da microbacia B4 revela que a maior concentração de chuvas no mês de abril possibilitou a geração de doze eventos chuva-deflúvio nessa unidade, sendo outros sete eventos distribuídos entre os meses de janeiro, fevereiro e maio. Conforme será discutido adiante, embora tenha havido muitos eventos para o ano de 2009, contabilizando um total de 23 eventos, vários desses foram de baixa magnitude com lâmina escoada inferior a 3 mm.

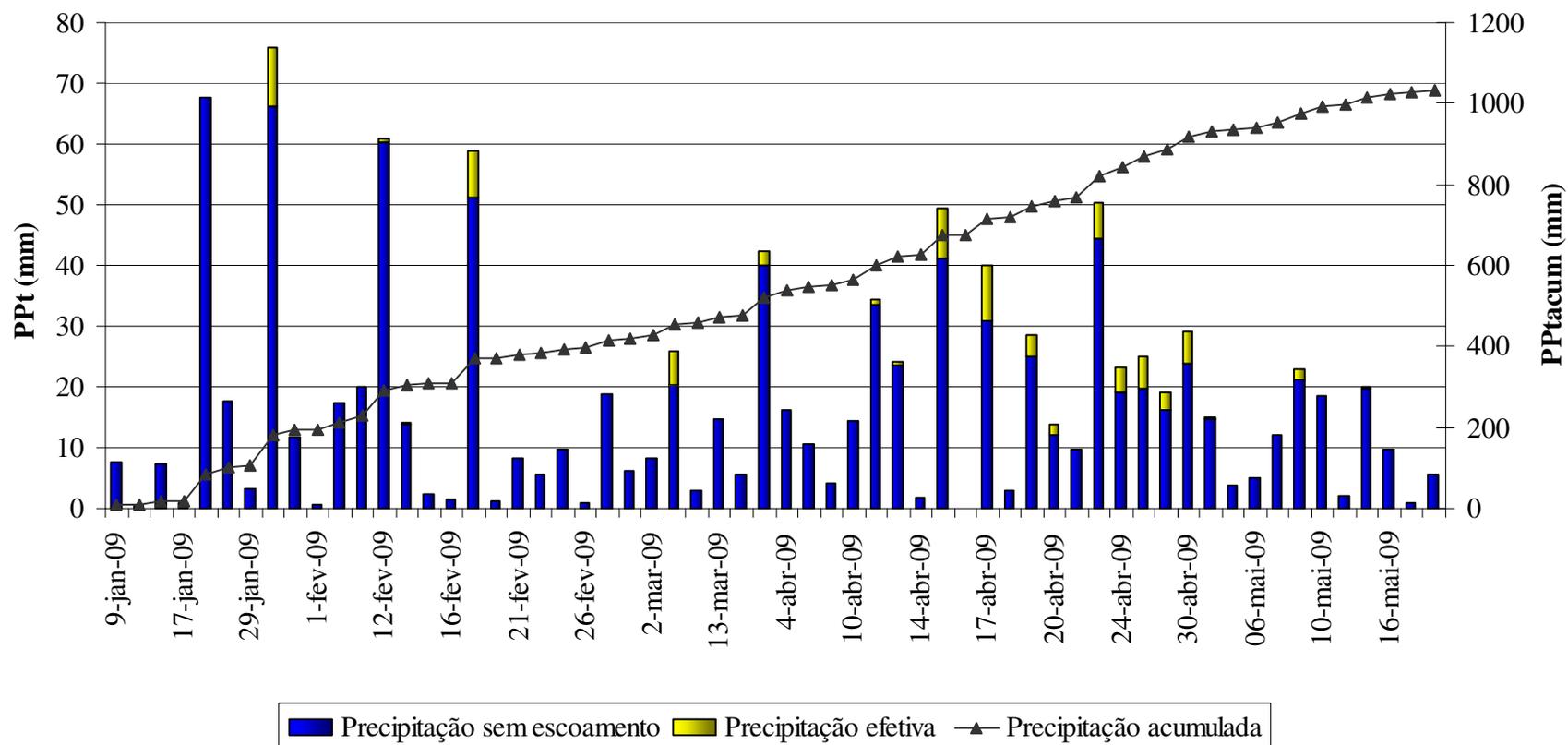


Figura 29 – Distribuição da precipitação pluviométrica e dos eventos geradores de escoamento de runoff na microbacia B4 para o ano de 2009.

Observou-se, da mesma forma que nas demais microbacias, grande variabilidade em escala de evento em todos os parâmetros analisados (Tabela 15). A descarga máxima verificada nessa microbacia coincidiu com o maior evento registrado em 2009 (30/01), atingindo um patamar de $58,61 \text{ L s}^{-1}$. Para este mesmo evento a intensidade máxima em 30 minutos (I_{30}), foi menor apenas que a do evento do dia 18/02, sendo neste último, registrado o segundo maior pico de descarga entre todos os eventos. Nem sempre eventos de grande magnitude são responsáveis pela geração de picos de descargas elevados nessa unidade de monitoramento, conforme averiguações do evento do dia 12/02, que apresentou a segunda maior altura pluviométrica do ano, todavia a descarga máxima foi uma das menores, com valor de apenas $2,47 \text{ L s}^{-1}$. De modo geral, verificou-se que os eventos de chuva apresentam duração média de 2,6 h, sendo que essa característica pode ter influenciado no amortecimento do hidrograma, reduzindo o pico de descarga, conforme averiguações do evento registrado no dia 12/02, quando a duração foi a terceira maior (3,92 h), produzindo um reduzido pico de descarga mesmo com I_{30} de $51,30 \text{ mm h}^{-1}$.

A umidade antecedente mostrou-se também como a variável de considerável importância para os valores de picos de descarga desta microbacia. Tal fato pode ser observado pela análise dos eventos registrados nos dias 24 e 25/04, em que o solo da bacia encontrava-se com alta umidade provocada pela sequência de eventos consecutivos anteriores (19 a 23/04). Nessa situação, com uma condição similar de umidade do solo devido à condição de encharcamento, a resposta hidrológica foi praticamente a mesma, demonstrado pela semelhança na descarga máxima e volume escoado. Outro fato que pode ser observado na Tabela 15 é que, embora o evento do dia 30/04 tenha apresentado uma altura pluviométrica similar a dos eventos ocorridos em 24 e 25/04, a vazão gerada pela chuva do dia 30/04 foi de $27,45 \text{ L s}^{-1}$, sendo aproximadamente três vezes superior àquelas registradas para os dias 24 e 25/04. Esse fato se explica pela intensidade da chuva, tendo essa uma duração de apenas 0,75 h e I_{30} de $55,88 \text{ mm h}^{-1}$. Já para o evento do dia 01/05/09 mesmo com solo com alta umidade, a baixa altura precipitada e intensidade não foram suficientes para elevar o valor de escoamento acima de 2%. Thomaz (2009), em pesquisa sobre processos de escoamento superficial, comenta haver uma grande instabilidade das respostas pela perda de umidade na camada superficial. O autor sugere haver um encolhimento no topo do solo mesmo em curtos intervalos de tempo como consequência da perda de umidade, causando assim modificações das respostas hidrológicas.

Mesmo sendo considerada uma unidade de monitoramento pequena (1,19 ha), com condições de controle maior que em escala de grandes bacias, os resultados reforçam a

complexidade de análise devido à dinâmica das variáveis envolvidas (GARFUR et al., 2003), tendo a necessidade de uma investigação mais detalhada das características de precipitação e umidade antecedente, como suporte em explicar a variação do deflúvio nessa unidade experimental.

Tabela 15 – Características hidrológicas da microbacia B4 para o ano de 2009: precipitação, duração da precipitação, vazão de pico (Q_{\max}), lâmina escoada (LE), coeficiente de runoff (C), volume escoado (V) e intensidade máxima para intervalos de 30 minutos (I_{30})

Microbacia 4 (B4)							
Evento	Ppt (mm)	Duração (h)	Q_{\max} (L s ⁻¹)	LE (mm)	C (%)	V (m ³)	I_{30} (mm h ⁻¹)
30/01/09	76,5**	3,75	58,61	9,91	12	91,58	62,22**
12/02/09	60,96	3,92	2,47	0,65	1	6,28	51,30
13/02/09	14,22	1,25	0,50	0,30	2	2,90	14,73
18/02/09	58,92	3,00	44,42	7,69	13	74,07	76,70
28/02/09	18,87**	2,00	0,5	0,17	1	1,44	21,42**
04/03/09	26,01	2,83	20,05	5,77	22	55,54	29,58
18/03/09	42,41	3,75	11,26	2,54	6	24,50	29,49
12/04/09	34,29	2,92	0,61	0,62	2	5,99	49,78
13/04/09	24,13	2,75	1,12	0,65	3	6,24	18,79
15/04/09	49,27	5,00	14,16	8,08	16	77,79	38,10
17/04/09	39,87	2,25	32,73	9,12	23	87,79	49,27
19/04/09	28,44	3,50	3,67	3,40	12	32,74	32,51
20/04/09	13,71	2,25	0,61	1,69	12	16,29	15,74
22 e 23/04	50,20	7,75	4,43	5,77	11	68,69	20,80
24/04/09	23,36	2,50	8,68	4,27	18	41,15	19,81
25/04/09	24,89	2,67	8,46	5,07	20	48,81	26,41
28/04/09	19,05	1,25	3,21	2,99	16	28,79	26,92
30/04/09	29,21	0,75	27,45	5,29	18	50,90	55,88
01/05/09	14,98	1,33	1,15	0,26	2	2,51	11,17
08/05/09	22,86	1,92	6,48	1,70	7	20,23	36,57
13/05/09	20,06	0,83	3,23	0,30	2	3,60	36,06
média		2,77	12,02	3,63	10,43	35,61	33,52
D.P.		0,02	0,16	0,03	0,07	0,31	0,17

**Dados extraídos do pluviógrafo da microbacia B1

Considerando a altura anual precipitada para o ano de hidrológico de 2009 de 1032 mm o escoamento total anual nessa microbacia foi de apenas 76,2 mm, que corresponde a somente 7,4% da precipitação anual. Considerando não haver perdas em trânsito, devido às dimensões da bacia, esse resultado sugere o alto poder de abstração desta microbacia, devido aumento da infiltração. Dentre as quatro unidades estudadas, a B4 foi a única que apresentou solos com caráter arenoso na camada superior do perfil (Tabela 6), com alto valor de condutividade hidráulica saturada (Tabela 9), conferindo-lhe uma maior capacidade de

infiltração. Essa peculiaridade foi um dos fatores principais na redução das vazões de pico, cujo valor médio foi somente de 12 L s^{-1} . Características morfométricas como rede de drenagem e forma da bacia tiveram também influência sobre as vazões de pico. A forma alongada de microbacia B4 contribuiu para redução da descarga máxima, pois o fluxo demora mais a atingir a seção de controle e aumenta o tempo de oportunidade de infiltração. (VILLELA; MATOS, 1977). O coeficiente de escoamento apresentou valores mínimo e máximo de 1 e 23%, sendo a média anual de 10,4%. Embora tenha sido constatada a importância da umidade antecedente sobre o escoamento desta microbacia, todavia verificou-se que mesmo após eventos sucessivos, com a série de eventos entre os dias 19 e 30/04, o escoamento não foi superior a 23% do total precipitado. Tais resultados lançam um alerta sobre generalizações a cerca de características hidrológicas, mesmo em bacias com condições climáticas similares. Apesar de mostrar-se dentro de uma mesma escala, com distância máxima entre as demais microbacias de apenas 560 m, os resultados mostraram grandes diferenciações hidrológicas entre elas, sendo o comparativo hidrológico necessário para entender os processos e evitar falha nas extrapolações de resultados. (ARAÚJO; PIEDRA, 2009). Mugabe, Hodnett e Senzanje (2007) reiteram que estudos em pequenas bacias são extremamente necessários para quantificar o potencial de água no sistema e identificar/desenvolver apropriadas estratégias agrícolas em áreas secas ou degradadas.

4.3 Comparativo hidrológico e análise de processos

Os dados de precipitação pluviométrica para as quatro microbacias monitoradas estão explicitados na Tabela 16. Um dos pluviômetros foi instalado em B1 e tomado também como representativo de B2, e os outros dois foram posicionados em B3 e B4. Pela análise dos três pluviômetros, constata-se que, de modo geral, há pouca variação de um pluviômetro para outro, com exceção de poucos eventos isolados, como por exemplo, o do dia 16/02, em que a precipitação em B3 foi aproximadamente três vezes superior a B1 e B2. Mesmo se tratando de microbacias próximas, a própria característica do clima da região com chuvas convectivas justifica essa variabilidade. As Figuras 30 e 31 representam a relação entre os valores de precipitação medidos nos pluviômetros das microbacias B1/B2 e B4, e entre B3 e B4, respectivamente. Observa-se pela reta 1:1, uma igualdade quase que perfeita entre os valores de precipitação medidos nos pluviômetros de B1/B2 e B4 (Figura 30), cujos equipamentos

distam em aproximadamente 260 m. Já com relação aos pluviômetros de B3 e B4 separados por uma distancia aproximada de 560 m, verifica-se uma dispersão maior dos dados em torno da linha de igualdade perfeita (Figura 31), porém mostraram-se fortemente correlacionadas, sugerindo dessa forma, que as precipitações registradas em qualquer uma das microbacias podem ser tomadas como representativa da área em estudo.

Tabela 16 – Dados de precipitação pluviométrica para a estação chuvosa de 2009 para as unidade experimentais B1, B2, B3 e B4

Data	PPt (mm)			Data	PPt (mm)		
	B1 e B2	B3	B4		B1 e B2	B3	B4
09/jan/09	7,5			05/abr/09	10,3	13,7	10,7
10/jan/09	0,7			06/abr/09	4,0	3,5	4,1
16/jan/09	7,3			10/abr/09	16,5	16,6	14,5
17/jan/09	0,9			12/abr/09	3,8	3,3	5,6
22/jan/09	67,7			13/abr/09	33,0	33,8	
23/jan/09	17,7			14/abr/09	2,1	2,2	1,8
29/jan/09	3,1			15/abr/09	42,8	42,0	46,0
30/jan/09	76,5			16/abr/09	2,0	3,4	
31/jan/09	11,9			17/abr/09	36,8	35,6	36,1
01/fev/09	0,6			18/abr/09	2,8	2,9	3,0
02/fev/09	17,4			19/abr/09		20,3	23,6
04/fev/09	20,4	15,8	18,6	20/abr/09	7,0	6,6	6,5
12/fev/29	53,0	51,0		21/abr/09	10,7	11,1	9,8
14/fev/29	2,0	1,5	2,5	22/abr/09	20,7	20,1	20,8
16/fev/29	2,0	6,6	1,6	23/abr/09	28,2	26,4	26,6
18/fev/29	61,0	64,8	55,5	24/abr/09	21,5	32,1	19,5
19/fev/09	1,6	1,9	1,3	25/abr/09	30,2	21,6	31,2
21/fev/09	9,0	9,0	8,3	28/abr/09	20,4	18,8	21,6
23/fev/09	4,8	4,0	5,6	30/abr/09	30,4	23,2	31,9
24/fev/09	9,5	10,1	9,7	1/mai/09	0,50	1,0	0,8
26/fev/09	0,8	0,7	1,0	2/mai/09	15,6	19,1	16,0
28/fev/09	25,0	21,0	26,7	5/mai/09	2,5	3,8	3,9
1/mar/09	6,0	4,7	6,2	6/mai/09	4,87	4,4	5,0
02/mar/09	7,6	7,8	8,1	8/mai/09	36,5	33,2	31,6
04/mar/09	29,9	28,3	31,1	10/mai/09	20,0	21,5	18,6
10/mar/09	2,4	3,6	3,0	12/mai/09	1,75	2,1	2,0
13/mar/09	15,3	15,6	14,8	14/mai/09	19,4	17,4	18,9
16/mar/09	6,1	5,0	5,5	16/mai/09	10,0	4,9	9,6
17/mar/09	19,4	16,8	19,0	18/mai/09	1,0	1,1	0,9
04/abr/09	15,1	16,1	16,2	19/mai/09	6,1	7,2	5,6

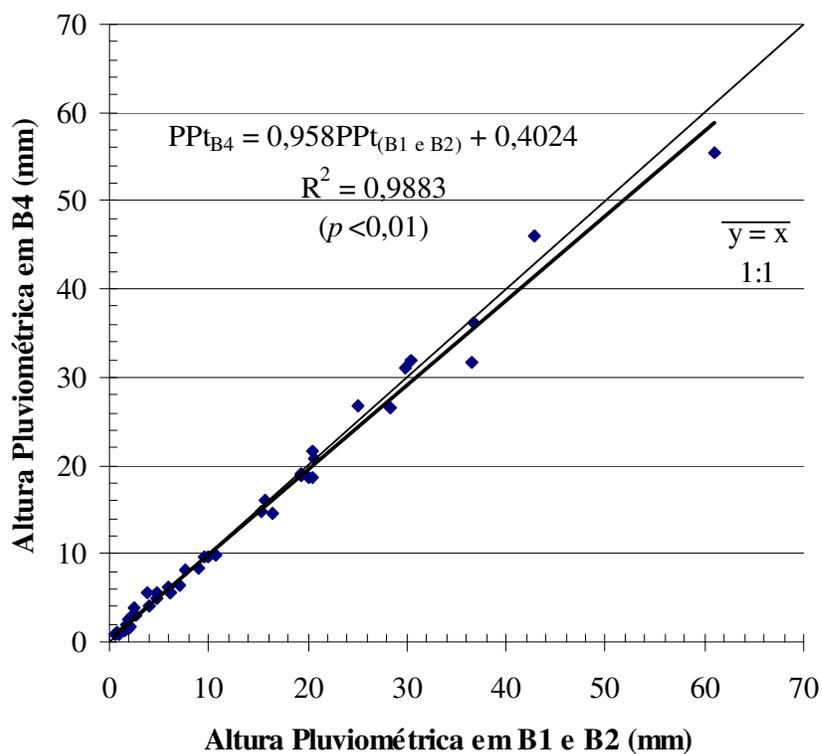


Figura 30 – Relação em os valores de precipitação pluviométrica medidos nas microbacias B1/B2 e B4 no ano de 2009.

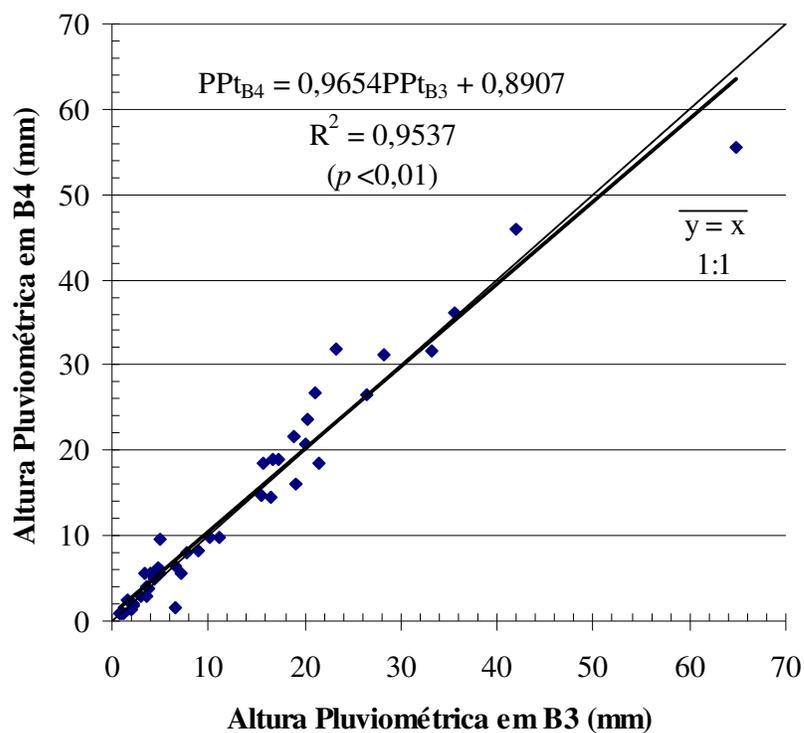


Figura 31 – Relação em os valores de precipitação pluviométrica medidos nas microbacias B4 e B3 no ano de 2009.

4.3.1 Características do escoamento das microbacias

As microbacias B1, B2, B3 e B4 apresentaram um caráter diferenciado na duração do deflúvio como resposta à duração da precipitação entre os eventos registrados em 2009 (Figuras 32 a 35). O tempo de deflúvio persiste o suficiente para superar o tempo de precipitação em uma razão média de 2,09; 2,38; 4,28 e 6,68 nas microbacias B1, B2, B3 e B4, respectivamente. Considerando o tempo de duração dos eventos de precipitação, que em sua maioria não excede três horas, o escoamento das microbacias se caracteriza como efêmero. A razão de 2,09 significa que em média existe deflúvio na microbacia B1 por somente 109% do tempo de precipitação, sendo este percentual de 138% em B2. Costa (2008), analisando a Bacia Experimental de Auiaba (BEA), considerada também como de escoamento efêmero, verificou relação inferior ao desse estudo, sendo atribuído ao tipo de escoamento, predominantemente hortoniano com grandes perdas em trânsito. Este tipo de escoamento também se verifica nas microbacias monitoradas, em que fortes variações nas intensidades são acompanhadas de variações nas vazões. Considerando as quatro microbacias, B1 é a que apresenta um caráter mais efêmero, sendo que em 2009 apenas um evento (24/04) gerou deflúvio por um período superior a 12 horas (Figura 32).

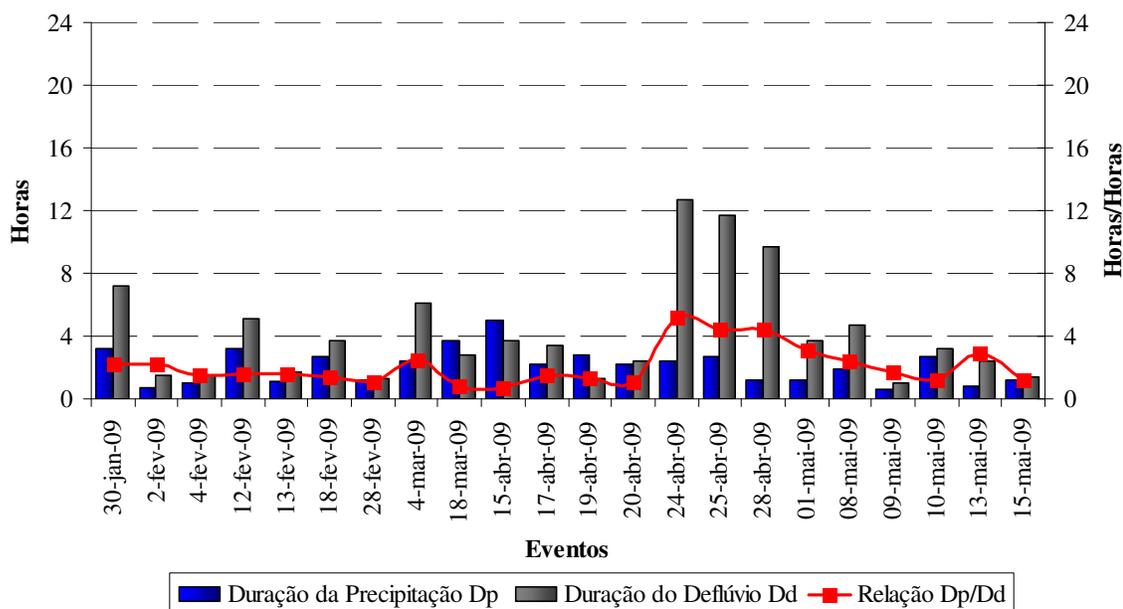


Figura 32 – Duração da precipitação (Dp), do Deflúvio (Dd) e relação entre as durações para os eventos da estação chuvosa de 2009, na microbacia B1.

Em B2 o escoamento apresentou-se ligeiramente superior a B1, conforme a relação de escoamento, tendo duração não mais que dezoito horas (Figura 33). Em média, essas duas microbacias apresentaram o mesmo tempo de deflúvio, com valor de 4,29 h em B2, contra 4,20 h em B1. Tal resultado expressa a similaridade entre as duas microbacias quanto à duração de deflúvio, mesmo essa última tendo parte de sua vegetação removida, e B2 com dimensões duas vezes superiores a B1. A microbacia B3, com o menor valor de declividade (5,5%), apresentou uma tendência de duração do escoamento mais elevado que as duas anteriormente mencionadas, tendo esta uma duração no escoamento médio quase três vezes a B1 e B2, podendo registrar, dependendo também das condições de umidade anterior, escoamento por um período de 24 horas (Figura 34).

Entre as quatro microbacias avaliadas, B4 foi a que se mostrou a mais distinta. Embora com caráter efêmero, apresentando em alguns eventos duração de deflúvio apenas 70% da precipitação. O escoamento dessa unidade, mais que nas outras, é fortemente influenciado pelo conteúdo de água no solo, passando em alguns momentos, dependendo do sequenciamento das chuvas, a apresentar um aspecto intermitente, apresentando deflúvio por vários dias consecutivos (Figura 35). Nessa microbacia, devido ao padrão arenoso do solo na camada superficial, com uma camada mais pesada imediatamente abaixo, predomina o escoamento subsuperficial, verificando-se a presença de uma suave lâmina durante várias horas (Figura 36). Esse padrão é muito importante nesta microbacia, que apresenta baixos picos de descargas, mesmo para eventos de alta intensidade (Tabela 15), sendo os incrementos de vazão proporcionados por condições prévias de saturação do solo. A geração de pico de descarga é expressivamente afetada pelas condições de umidade anterior, além das características de precipitação e vegetação, corroborando com os resultados de Iroumé, Maye e Huber (2006) e Garcia-Ruiz et al. (2008), que verificaram alterações das descargas máximas como consequência das características da precipitação e condições de umidade antecedente.

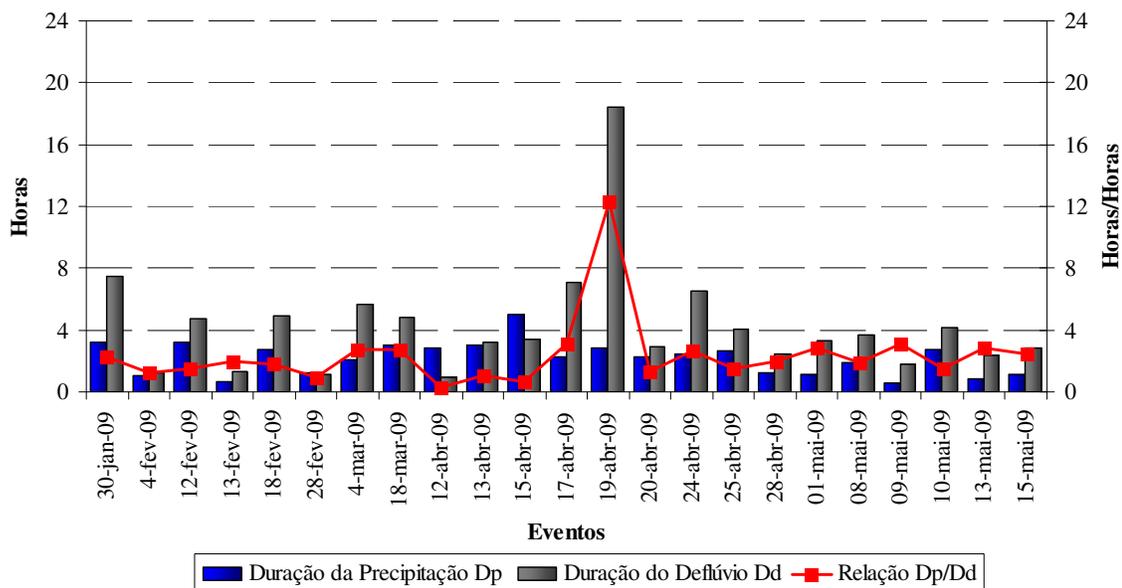


Figura 33 – Duração da precipitação (Dp), do Deflúvio (Dd) e relação entre as durações para os eventos da estação chuvosa de 2009, na microbacia B2.

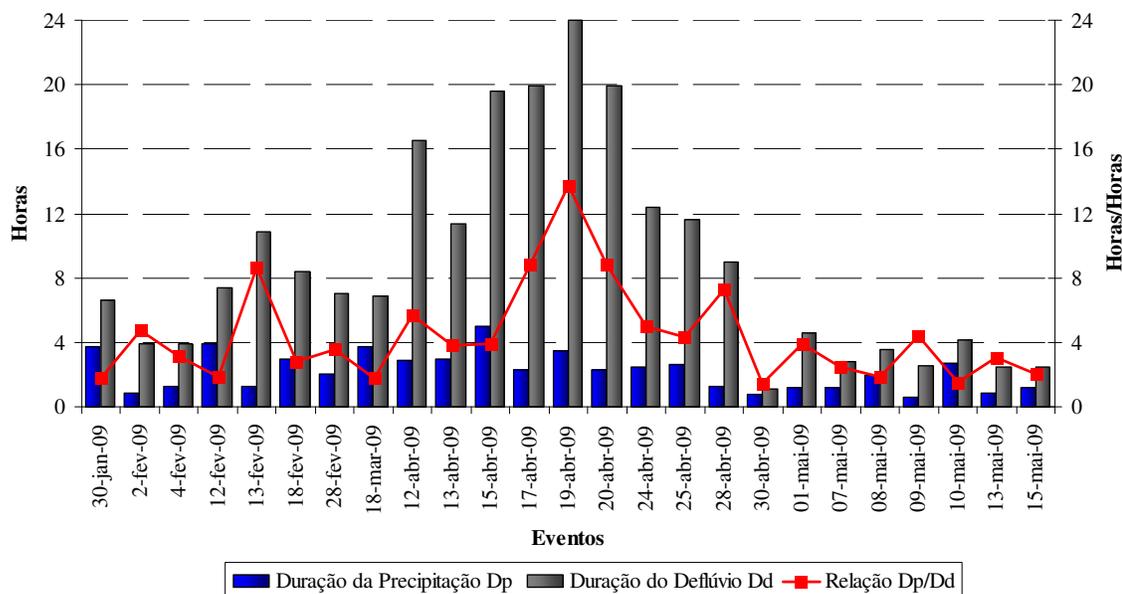


Figura 34 – Duração da precipitação (Dp), do Deflúvio (Dd) e relação entre as durações para os eventos da estação chuvosa de 2009, na microbacia B3.

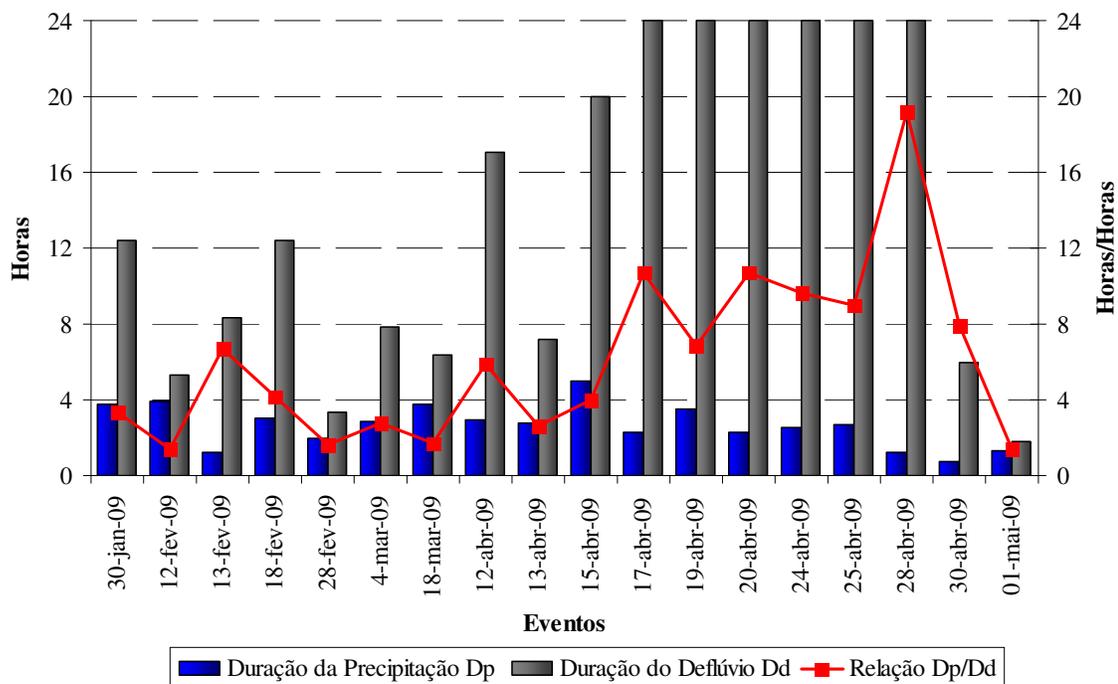


Figura 35 – Duração da precipitação (Dp), do Deflúvio (Dd) e relação entre as durações para os eventos da estação chuvosa de 2009, na microbacia B4.



Figura 36 – Lâmina escoada sobre o curso principal da unidade experimental B4 (abril 2009).

4.3.2 Comparativo dos eventos chuva-deflúvio sobre as microbacias

Conforme mencionado, 2009 foi considerado um ano com precipitações bem distribuídas no tempo atingindo um total acumulado acima da média histórica, sendo responsável pela geração de 24; 25; 26 e 21 eventos chuva-deflúvio, nas unidades experimentais, B1, B2, B3 e B4 respectivamente, sendo a maioria deles distribuídos no mês de abril. Efetuou-se uma análise comparativa entre a lâmina e o volume escoado nas quatro microbacias (Figura 37). Essa avaliação torna-se importante na verificação das alterações hidrológicas resultantes da ação antrópica, já que a microbacia (B1) foi raleada para representar um dos usos da terra praticados pelo homem rural sobre pequenas bacias do semiárido. Das quatro microbacias avaliadas, B1 e B2 tiveram uma análise comparativa mais detalhada, em função da proximidade, e da maior similaridade edafo-climática e morfométrica, sendo uma deliberadamente alterada (B1), e a outra com características preservadas (B2), servindo como padrão de comparação entre ambas.

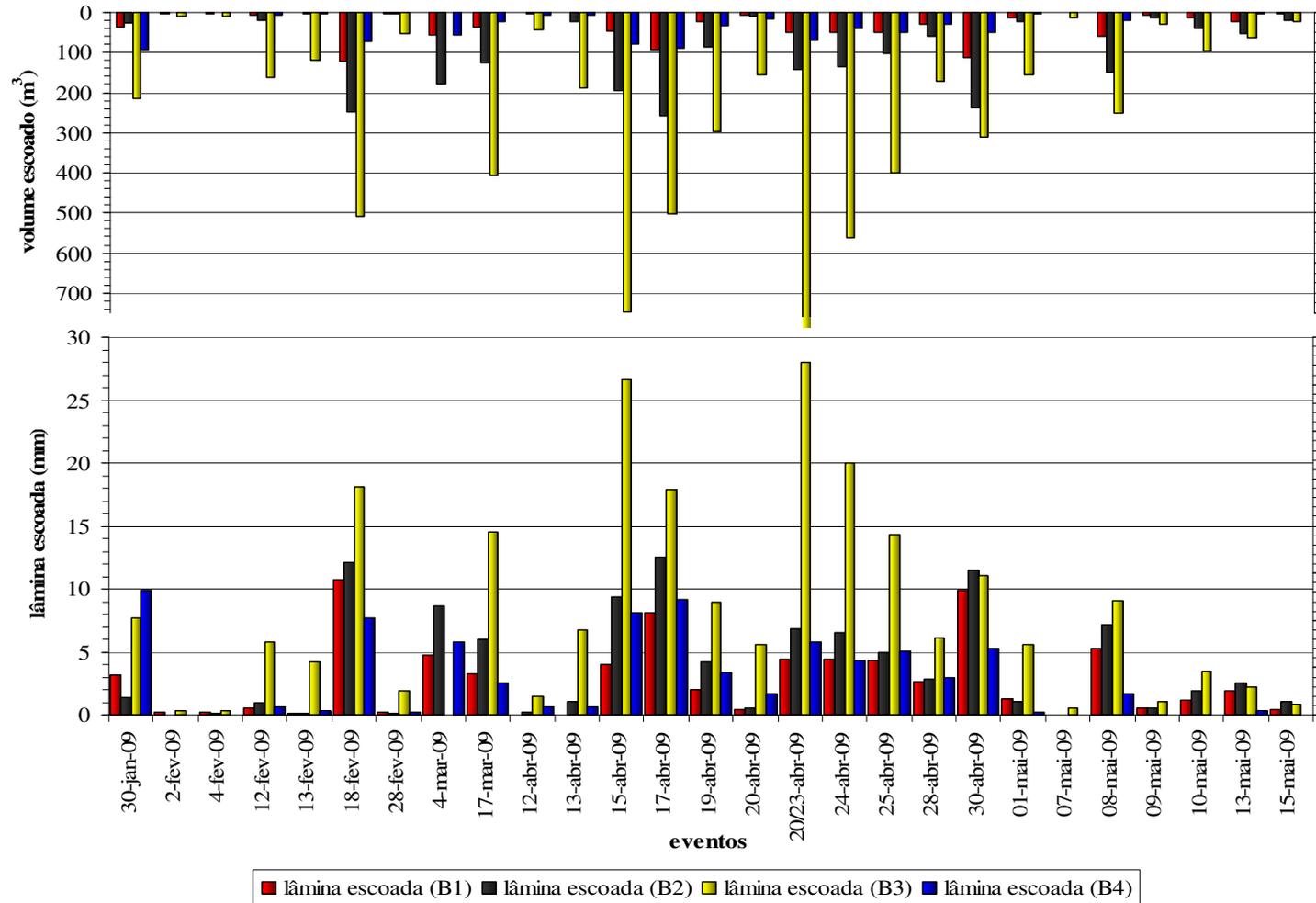


Figura 37 – Comparativo hidrológico sobre os parâmetros: lâmina escoada e volume escoado para as microbacias B1 e B2, para a estação chuvosa de 2009.

Ao contrário do ano de 2008, em que se constataram lâminas escoadas de até 40 mm, de modo geral, devido à magnitude dos eventos de 2009, as lâminas escoadas não ultrapassaram 10 mm, exceção feita ao evento de 18/02, cujas lâminas escoadas atingiram 10,7 e 12 mm em B1 e B2, respectivamente, e em 17/04 em que foi alcançado 12,5 mm em B2. O tratamento conduzido em B1 foi aplicado em novembro de 2008 e observou-se para o primeiro evento do dia 30/01/09 (com geração de escoamento), comparando B1 e B2, uma diferença percentual de 23% sobre o volume escoado entre ambas, com o volume escoado maior em B1, quando se compara a lâmina escoada essa diferença aumenta para 39,9%.

Considerando que B1 apresenta área de drenagem com dimensão duas vezes inferior a B2, e que nos eventos subsequentes (a partir de 12/02) os maiores volumes e escoamentos passaram a ser verificados em B2 (Figura 37), a diferença no volume e também na lâmina (que elimina o fator área) acredita-se ser atribuída ao tratamento aplicado em B1. Este resultado demonstra que a cobertura vegetal é um fator chave sobre a redução da lâmina escoada, parâmetro que desconsidera a influência da área, corroborando com resultados de Garcia-Ruiz et al. (2008), que verificaram a importância da vegetação sobre o deflúvio em microbacia preservada. Essa mesma tendência foi também observada em 04/02.

Já para o evento do dia 02/02, devido a falhas nos sistema de aquisição e transmissão dos equipamentos de B2 que impediram a coleta de dados, nada se pode inferir sobre o seu comportamento. Para os eventos registrados a partir de 12/02 constatou-se uma inversão de comportamento, sendo o volume, lâmina escoada e coeficiente de escoamento, registrados em maior magnitude em B2, mesmo após o tratamento sobre B1. Acredita-se que este comportamento esteja associado ao crescimento da vegetação herbácea após o tratamento, servindo como uma barreira, promovendo a infiltração e favorecendo a retenção de água, reduzindo dessa forma o escoamento sobre a bacia, expressando assim a importância da vegetação rasteira na resposta hidrológica das microbacias.

O crescimento vegetal iniciou-se após os primeiros eventos de chuva que ocorreram em 09/01 e se estendeu até o final da estação chuvosa. De fato, a quantidade de cobertura vegetal é menor no início da estação chuvosa e final da estação seca, aumentando progressivamente durante a estação chuvosa. Uma vez estabelecida, a cobertura vegetal sobre o solo passa a atuar como ponto de dissipação de energia promovendo, assim, uma maior oportunidade de infiltração e favorecendo a retenção de água no sistema. Srinivasan, Santos e Galvão (2003) verificaram maiores lâminas escoadas sobre microbacias desmatadas em Sumé-PB, apontando sobre a importância de se manter a área totalmente desprovida de vegetação após o tratamento, retirando até mesmo a vegetação rasteira remanescente.

Além do crescimento da vegetação rasteira sobre a microbacia, parte da vegetação do próprio tratamento foi mantida sobre o solo, tendo dessa forma também influência sobre a redução do escoamento. Constatou-se, principalmente a partir de 18/02, que a condição de cobertura vegetal passa a exercer pouca influência sobre o volume escoado, sendo este, maior em B2, com valor médio de 144% superior a B1. Considerando-se as características de precipitação pluviométrica como as mesmas para ambas, e que as duas encontram-se sobre uma mesma mancha de solo, logo a resposta de escoamento superficial a um evento qualquer de chuva passa a ser influenciada principalmente pelo fator escala, tendo B2 área de drenagem 100% maior que B1. Cantón et al. (2001) verificaram em microbacias no semiárido Espanhol diferenças no escoamento atribuído também às dimensões entre bacias.

A microbacia B4 mostrou comparativamente a B1 uma grande semelhança com relação aos valores médios de lâmina escoada, volume escoado e coeficiente de escoamento, sendo os valores de B1 ligeiramente inferiores aos de B4, mesmo com tratamento de raleamento aplicado em B1. Os valores foram de 3,07 mm; 35,23 m³ e 10,35% na unidade experimental B1, contra 3,63 mm; 35,61 m³ e 10,43% em B4. Embora tenha sido verificada grande distinção com relação ao pico de descarga, sendo essa variável menor na maioria dos eventos em B4, a similaridade das variáveis acima sugere uma aproximação hidrológica entre essas duas microbacias, mesmo com grande distinção edáfica.

Há, entre as unidades experimentais B1 e B4, uma grande aproximação morfométrica (área, comprimento do curso principal e declividade) (Tabelas 1), com influência sobre a convergência de resultados. A distinção das respostas hidrológicas ocorreu principalmente sobre os valores de descargas máximas e na forma de escoamento, influenciadas pelas características de solos. Na microbacia B1, que apresenta solos com caráter mais siltoso com baixos valores de condutividade hidráulica saturada nas camadas superficiais e subsuperficiais, predomina escoamento direto sobre o solo, com relevante contribuição na elevação das descargas máximas. Por outro lado, B4, com presença de solos franco-arenosos na superfície e baixa condutividade hidráulica nas camadas subsuperficial e com limitada capacidade de armazenamento de água, e ainda apresentando uma forma mais alongada, converge em uma atenuação das vazões extremas e na predominância de escoamento subsuperficial. Ressalta-se mais uma vez a necessidade de se conhecer a física do solo para melhor se explicar as respostas hidrológicas.

De todas as microbacias analisadas no ano de 2009, B3 apresentou os maiores valores de lâmina escoada e volume escoado (Figura 37). Nessa unidade o volume escoado alcançou em um evento individual (22/23 de abril) o valor de 785 m³, convergindo para uma

lâmina escoada de 28 mm, sendo nessa microbacia constatados os maiores coeficientes de escoamento. Verifica-se que, dependendo das condições de armazenamento de água no solo, podem haver situações em que 86% da precipitação será convertida em escoamento, conforme averiguações do evento do dia 24/04/09. Acredita-se que as maiores lâminas escoadas nessa microbacia estejam relacionadas não apenas a maior área de drenagem (2,8 ha), como também à estrutura do solo. Entre as quatro microbacias, B3 mostrou-se, de acordo com observações de campo, a única a apresentar solo cuja remoção ocorre com agregados em forma de blocos que se expandem na estação chuvosa (Figura 38). Acredita-se que essa forma de agregação tenha contribuído para redução da infiltração, aumentando a capacidade de escoamento superficial e também a produção de sedimentos na bacia. No entanto, sugere-se como forma de melhor caracterização que estudos posteriores contemplem dentre outros parâmetros, a estrutura do solo como indicador dos processos envolvidos no escoamento e erosão hídrica dessa unidade experimental. Ghidin et al. (2006), comentam sobre a influência da estrutura em blocos na formação de solos com maior grau de agregação, com influência na redução da permeabilidade e maior tendência à erosão laminar.



Figura 38 – Agregados em forma de blocos encontrados nos solos da microbacia experimental B3 (estação seca).

4.4 Análises de Hidrogramas

Os hidrogramas e as características dos eventos de precipitações dos dias 30/01 e 18/02/09 nas microbacias B1 e B2 foram tomados para análise (Figuras 39 e 41), devido à

magnitude e importância para o ano hidrológico de 2009, sendo o hidrograma do dia 30/01 o único em que se verificou o maior pico de descarga para B1 em detrimento de B2 (efeito atribuído ao tratamento em B1), e o do dia 18/02, que apresentou o maior pico de descarga entre os eventos para este ano. A forma dos hidrogramas quando analisados em escala de eventos, são praticamente idênticos, bem como a resposta à intensidade das precipitações nas duas microbacias (Figura 39 e 41). Observa-se no evento do dia 30/01 a necessidade de um acumulado de aproximadamente 35 mm para iniciar o escoamento (Figura 39), sendo o início quase que instantâneo nas duas microbacias. Isto ocorreu devido à similaridade do tempo de concentração (T_c) das microbacias, sendo o T_c da B2 superior em apenas 2 minutos ao da B1 segundo modelo empírico de Kirpich, que leva em consideração apenas características morfológicas da bacia. Para este evento foram necessárias intensidades de chuvas de 61 mm h^{-1} , para ter início o escoamento. Ressalta-se que, embora os modelos aplicados às microbacias conduzam a um baixo valor de T_c , averiguações de campo sugerem valores bem superiores ao estimados, apontando para a baixa aplicabilidade desses modelos quando empregados para pequenas escalas. Tal fato sugere a necessidade de estudos envolvendo fatores dinâmicos como, por exemplo, a intensidade da precipitação.

Depois de cessado o escoamento, com condições de alta umidade do solo, intensidade de precipitação de aproximadamente 10 mm h^{-1} , foi suficiente para retomar o escoamento (Figura 39). Ainda analisando esse evento, que foi o primeiro a gerar escoamento depois de conduzido o raleamento em B1, constatou-se um maior valor de descarga máxima nessa unidade em comparação a B2, conforme constatado nos dois picos do hidrograma. Devido à menor dimensão da área de drenagem e declividade de B1, o maior valor de pico de descarga reforça a análise da Figura 37, e acredita-se expressar o efeito da ação antrópica na modificação do comportamento hidrológico dessa bacia como consequência do distúrbio da cobertura vegetal devido ao tratamento aplicado.

Apesar do aumento no pico de vazão em B1 para o evento do dia 30/01, a lâmina escoada mostrou maior variação quando comparada ao pico de descarga (Figura 37). Constatação semelhante também verificada por Iroumé, Mayer e Huber (2006) em microbacia com clima temperado no Chile. Contudo, apesar dessa verificação, que ocorre apenas sobre os primeiros eventos, o efeito do tratamento raleamento em condições de Caatinga em resposta à elevação das descargas máximas, não se mostrou totalmente conclusivo, apesar de forte evidência do incremento de vazão pela intervenção antrópica. Dessa forma, o crescimento da vegetação herbácea após o tratamento e a manutenção dos restos culturais sobre o solo como consequência do próprio raleamento, tiveram influência sobre as respostas hidrológicas,

tornando-se necessárias observações mais sequenciadas e com investigação sobre qual cobertura vegetal promove maior escoamento sobre a área: herbácea ou arbórea.

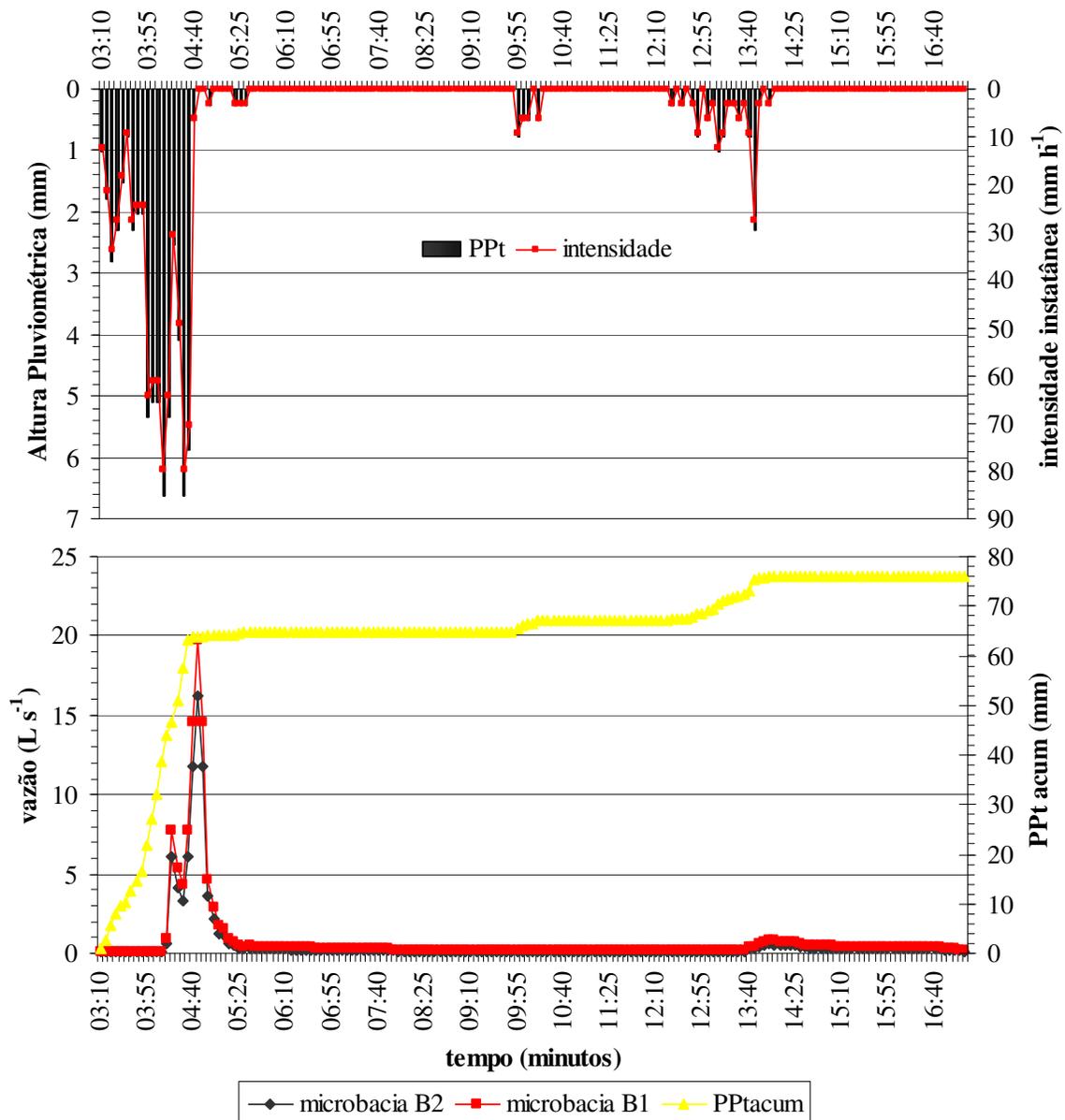


Figura 39 – Hidrogramas de B1 e B2, e características da precipitação para o evento do dia 30/01/09

Observou-se que, a partir dos eventos do dia 12/02 (Figura 37), devido ao rápido crescimento de vegetação rasteira na microbacia B1, os hidrogramas dessas microbasins se configuram de forma inversa, sendo a maior descarga constatada em B2 (Figura 40). A partir desta data ocorreu o aporte de vegetação herbácea sobre B1 e, os incrementos nos picos de descarga passam a ser atribuídos à área de contribuição, sendo os maiores valores verificados

sobre B2 (maior área de drenagem). Além deste fator, a microbacia B2 apresenta também uma rede de drenagem bem mais definida que B1, podendo assim facilitar a canalização do fluxo, contribuindo para elevação do pico do hidrograma. Bartley et al. (2006), em investigação sobre influência da cobertura vegetal sobre escoamento superficial em microbacias de clima semiárido na Austrália, constataram forte influência da área e definição dos cursos sobre aumentos nas vazões de pico. Acredita-se que a topografia não tenha sido o fator de destaque sobre as diferenças nas respostas hidrológicas atuantes, uma vez que esse parâmetro mostrou com bastante similaridade entre as bacias (Tabela 1).

Em resumo, a proporção de cobertura de vegetação pode ser considerada um fator importante na influência sobre o movimento de água no solo, podendo sua remoção alterar o comportamento hidrológico e, portanto influenciar na disponibilidade desse recurso. Contudo, se a prática de retirada da cobertura vegetal não puder ser evitada, a conservação dos resíduos culturais sobre o solo, pode favorecer à infiltração, contribuindo para manutenção de água no sistema pela redução do escoamento superficial. (KANG et al., 2001). Mesmo com esse poder resiliente, sendo confirmado pela alteração no padrão da hidrógrafa, promovido pelo rápido crescimento vegetativo, os resultados sugerem a influência do tratamento aplicado sobre alterações hidrológicas.

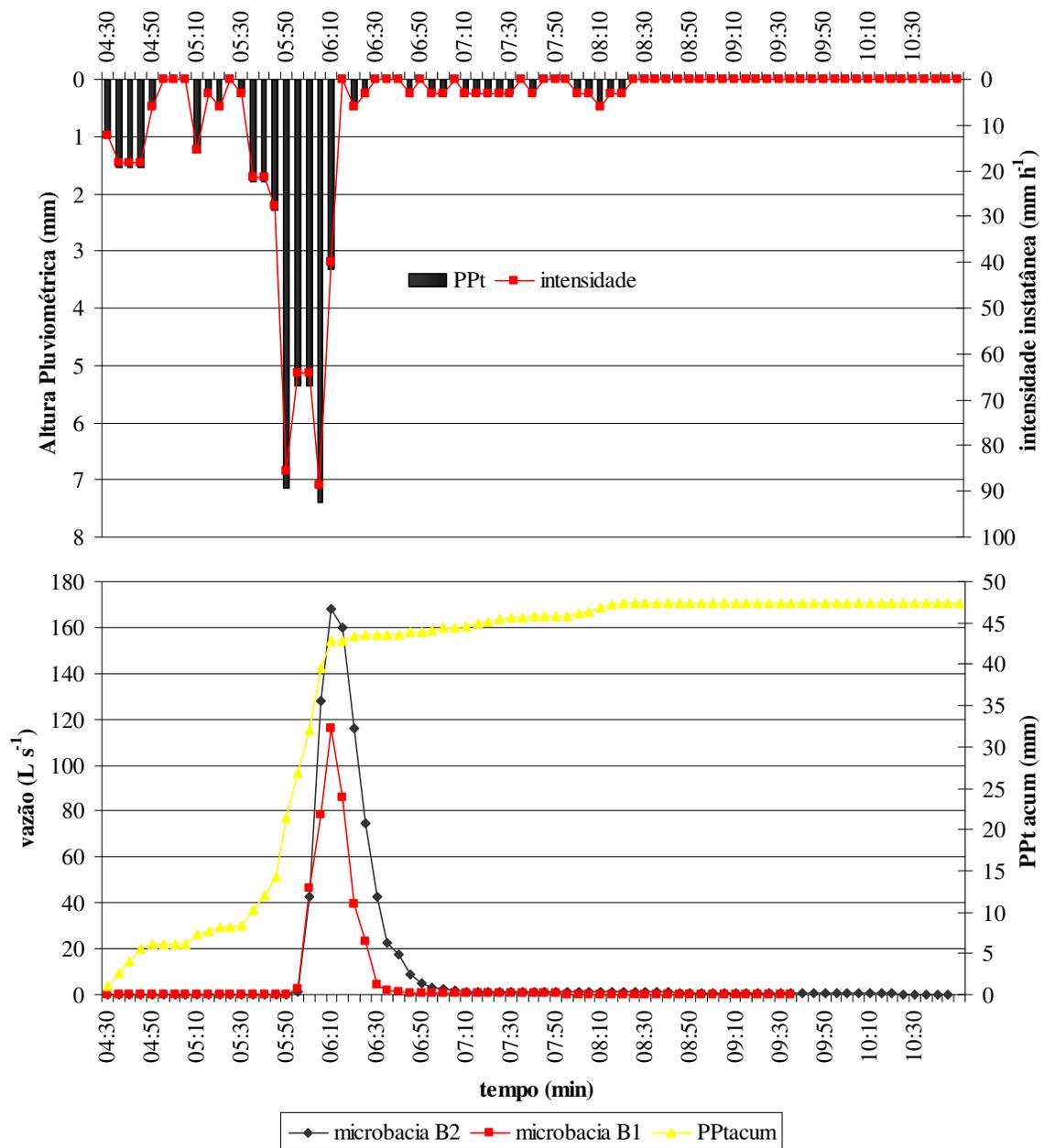


Figura 40 – Hidrogramas de B1 e B2 e características da precipitação para o evento do dia 18/02/09.

Na Figura 41 observa-se um conjunto de hidrogramas para dois eventos consecutivos de similar magnitude, com suas respectivas características de precipitação nas quatro microbasias monitoradas. Como se observou para a estação chuvosa de 2009 que uma grande parcela (29%) dos eventos geradores de escoamento superficial encontra-se dentro da classe de precipitação de 15 a 30 mm, os dois eventos abaixo apresentados (24/04 e 25/04)

com acumulado de 23,1 e 24,6 mm podem ser analisados com representatividade para este ano. Os cinco dias que antecederam os eventos dos dias 24 e 25/04 apresentaram escoamento, com um total precipitado acumulado de 92 mm, uniformemente distribuídos entre os dias 19 a 23/04.

Percebe-se comportamento similar no início do escoamento em todas as unidades avaliadas, com respostas muito rápidas na seção de controle. Nessa situação, ou seja, os solos com alto teor de umidade, um acumulado de apenas 7 mm e intensidades de precipitação de aproximadamente 30 mm h^{-1} , foram suficientes para iniciar o escoamento, quase que simultaneamente nas quatro microbacias. Em condições de saturação do solo com eventos de similar magnitude, com relação ao total precipitado, duração e intensidade, a resposta hidrológica assemelhou-se bastante entre eventos nas microbacias, estando B3 com maior propensão em registrar maiores picos de descarga, conforme averiguações da Figura 41.

Para essa condição específica, na qual a redistribuição de água no solo é muito lenta, dado o curto intervalo de tempo entre eventos, a similaridade entre os picos de descarga nos dois eventos sugere a importância do conteúdo de água no solo. Os picos de descarga nessa condição de umidade em todas as microbacias foram superiores a eventos de maior expressão (maior lâmina precipitada), como os de 12/02 e 12/04. Sendo que nos quatro dias anteriores a 12/02 não houve escoamento, e o evento de 12/04 foi antecedido de 24 dias sem escoamento. Garcia-Ruiz et al. (2008) afirmam que chuvas com moderada a baixa intensidade que ocorrem algumas horas depois de outro importante evento de chuva, tendem a produzir altas descargas, sugerindo que nesses eventos a bacia inteira contribui para o escoamento. Essa análise reforça a importância das condições de pré-evento em contribuir para o processo de escoamento superficial e elevar os picos de descarga sobre as microbacias. (IROUMÉ; MAYER; HUBER, 2006; CANTÓN et al., 2001; CEBELLOS; SCHNABEL, 1998).

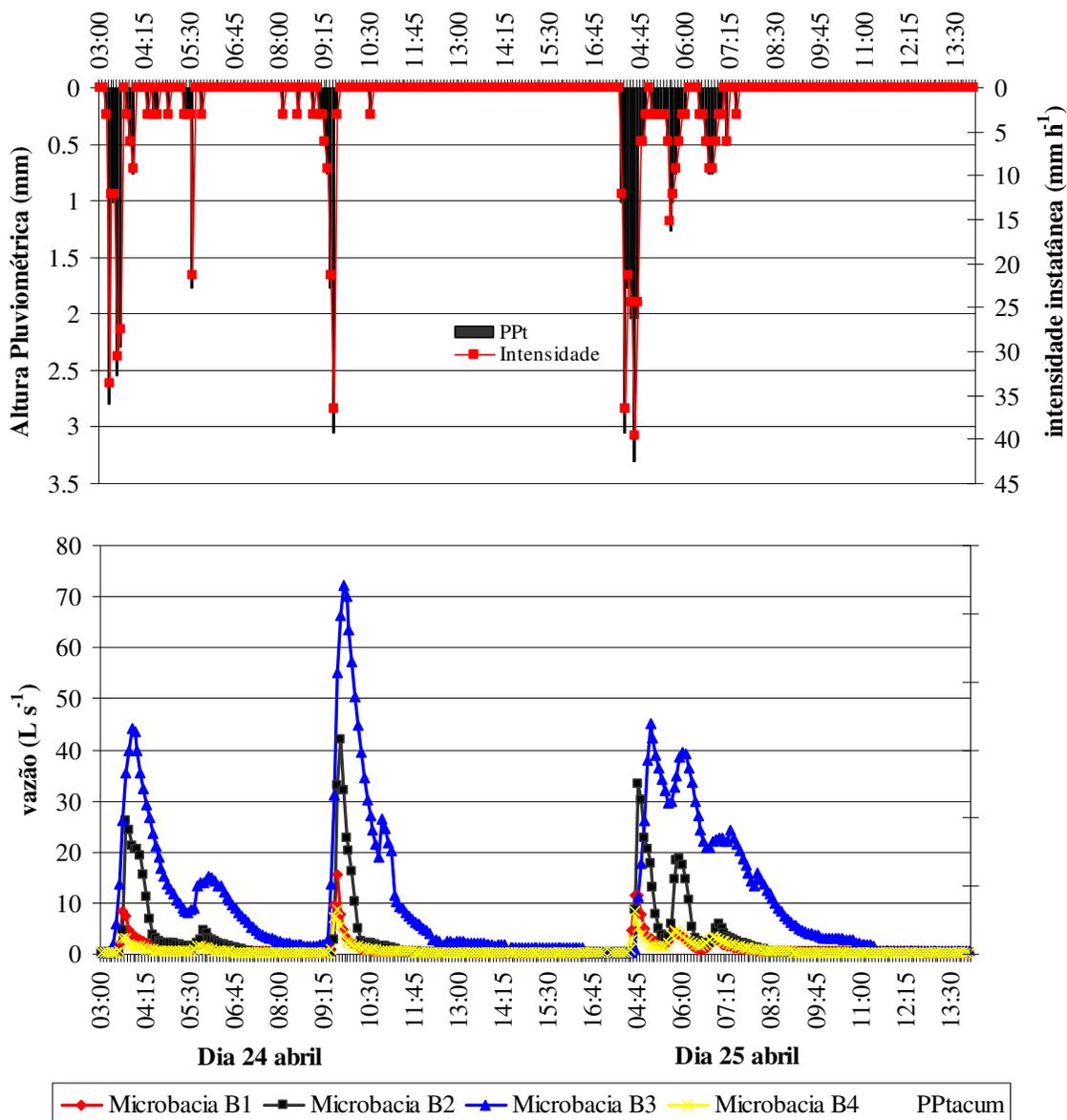


Figura 41 – Hidrogramas das microbacias, B1, B2, B3 e B4 e características da precipitação para os eventos dos dias 24 e 25 de abril de 2009.

4.5 Produção de sedimentos

4.5.1 Produção de sólidos nas microbacias

A produção de sólidos totais coletados nas torres em eventos que produziram escoamento superficial nas quatro microbacias está presente na Figura 42. Devido ao pequeno

orifício dos tubos coletores, em alguns eventos deste ano, ocorreu a obstrução do tubo de acesso à garrafa em algumas torres, não se podendo dessa forma inferir sobre os eventos. Apesar da similaridade de precipitação e intensidade entre as quatro unidades, a saída de sólidos das microbacias mostrou um padrão bastante diferenciado. As concentrações apresentaram-se dentro da amplitude de 5.489 a 158 mg L⁻¹, para os eventos dos dias 30/04 e 30/01, em B2 e B4, respectivamente. A produção média de sólidos foi bastante similar nas microbacias B1 e B2, como menor produção sendo verificada em B4.

Analisando os dados disponíveis para as microbacias B1 e B2, constata-se uma tendência de alta produção de sólidos em dois períodos, um deles nos eventos compreendidos entre 18/02 e 04/03 e outro de 30/04 a 13/05 (Figura 42). Para o evento do dia 18/02 o valor da produção de sedimentos se justifica pela magnitude do evento, sendo este considerado o maior para o ano de 2009, como pico de descarga atingindo 115 e 168 L s⁻¹ em B1 e B2 respectivamente, e com I₃₀ de 61,2 mm h⁻¹ (Tabelas 11 e 13). Já para o evento seguinte (04/03), embora de menor magnitude que o primeiro, com I₃₀ de 29,5 mm h⁻¹, registrou também uma alta produção de sedimentos. Os resultados sugerem ter havido conectividade entre os eventos. Dessa forma, as características do evento do dia 18/02, podem ter influenciado na remoção e transporte de sedimentos para os pontos mais baixos da bacia, e depósito sobre o canal principal (Figura 43), que passou a ser transportado e coletado no evento subsequente (04/03).

Mesma análise pode ser feita nas microbacias B2 e B3, sendo essa mesma tendência verificada para os eventos dos dias 30/04 e 13/05. Essa condição de produção e transporte de sedimentos por eventos sucessivos, pode sugerir que os sedimentos e com eles nutrientes, podem deixar a bacia em pequenos intervalos de tempo, devido à rapidez do fluxo, e pelo fato de o transporte tornar-se facilitado pela presença de sedimentos diretamente sobre a rede de drenagem. Por outro lado, no evento do dia 30/04, embora de menor magnitude que o do dia 18/02, recebeu forte influência da intensidade da chuva e das condições de umidade antecedente na elevação da descarga máxima e produção de sedimentos.

Destaca-se que a similaridade na produção média de sólidos entre B2 e B1 (raleada) ocorreu pela influência de dois eventos: 30/04 e 13/05. De todos os eventos registrados, o evento do dia 30/04 foi o de menor duração (Tabela 13), com I₃₀ de 55,8 mm h⁻¹ e I₅ atingindo a taxa de 97,5 mm h⁻¹. Um outro aspecto importante sobre este evento é que sua ocorrência foi verificada em condições de alto conteúdo de água no solo. Nele verificou-se o maior coeficiente de escoamento em B1 e B2. A baixa capacidade de infiltração aliada à alta intensidade do evento favoreceu o arraste de sedimentos e deposição nas áreas mais baixas.

Foi também neste evento que se verificou a maior produção de sedimentos em B3 e B4, com valores de 1549 e 792 mg L^{-1} , respectivamente. Considerando que B1 foi raleada, a maior concentração de sedimentos na maioria dos eventos (principalmente sobre os primeiros), reforça o papel da intervenção humana como agente modificador das paisagens, alterando de forma expressiva o balanço sedimentológico em pequenas bacias hidrográficas. (GARFUR et al., 2003; GERMER et al., 2009).

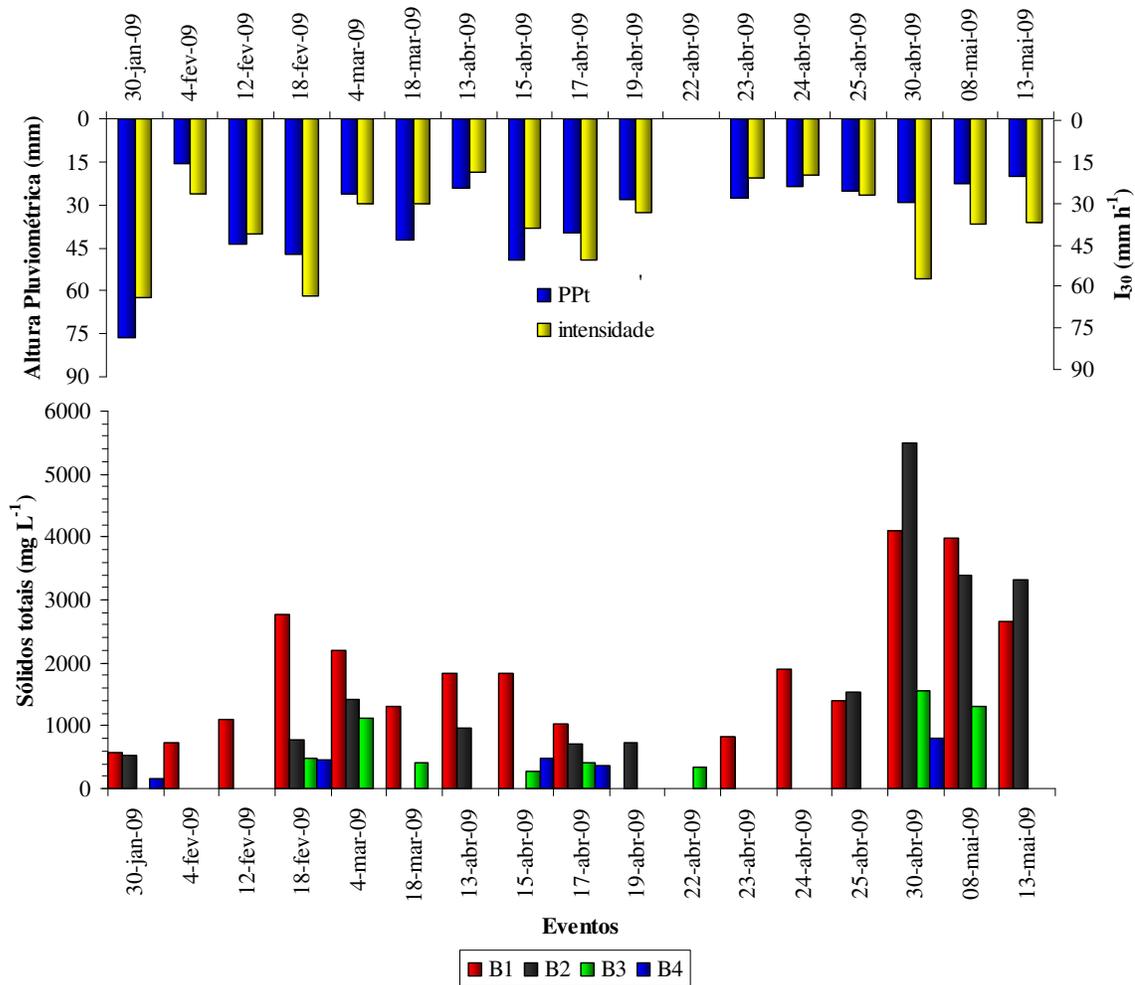


Figura 42 – Distribuição da produção de sólidos totais para os eventos geradores de escoamento superficial nas quatro microbacias.



Figura 43 – Depósito de sedimentos no canal principal provocado por eventos anteriores na microbacia experimental B1.

Os resultados encontrados mostram que embora tenha havido a formação de um dossel herbáceo sobre o solo após o tratamento em B1, ocorreu uma considerável produção de sedimentos nesta unidade, mostrando-se sensível a intervenção antrópica. Considerando a fragilidade da Caatinga em resposta à modificação da paisagem natural, torna-se importante questionar sobre a sustentabilidade desse ecossistema mediante práticas de remoção da cobertura vegetal/uso da terra. Se por um lado essas práticas são usadas como forma de garantir aumento imediato de produção agrícola, mediante aumento da disponibilidade de áreas marginais para cultivo, por outro, pode trazer sérios reflexos negativos, conforme mostrado, reduzindo a fertilidade natural do solo através do exporte de solutos. Mudanças na paisagem natural, tanto do ponto de vista hidrológico como sedimentológico, como consequência da ação antrópica tem sido reportada por vários autores, que apontam a necessidade de adoção de estratégias, como manutenção da cobertura vegetal, com forma de melhor gerenciamento dos recursos solo e água. (IROUMÉ et al., 2006; ALBUQUERQUE; LOMBARDINI NETO; SRINIVASAN, 2001).

Conforme discutido, a concentração média de sedimentos em B2 foi principalmente influenciada pelos últimos eventos (30/04 e 13/05/09). Considerando que para este ano tiveram outros de maior magnitude com relação à altura e intensidade de precipitação, porém com produção de sedimentos de menor magnitude, acredita-se que a alta produção de sedimentos em B2, principalmente nos últimos eventos, possa ter entre outros, sofrido também influência da presença de zonas desprotegidas em B2. Embora essa microbacia tenha apresentado uma densa cobertura vegetal em quase toda a sua extensão, observações de campo constataram algumas zonas desprotegidas nas partes altas da microbacia B2, sendo essas de alta suscetibilidade à erosão, funcionando como bancos de sedimentos (Figura 44). Acredita-se que essas áreas possam ter tido contribuição na produção

de sedimentos, principalmente nos últimos eventos, superando os valores de B1, mesmo com esta última tendo parte de sua vegetação removida. Bartley et al. (2006) demonstraram a importância de zonas desprotegidas sobre a produção de sedimentos em microbacias hidrográficas no semiárido australiano. Estes autores comentam que mesmo em locais com similaridade de cobertura vegetal e declividade, esses podem ter diferentes respostas sedimentológicas, dependendo de arranjo da vegetação da bacia.



Figura 44 – Zonas desprotegidas nas partes altas da microbacia experimental B2.

A microbacia B3 apresenta uma baixa declividade (5,5%), passando a atuar como uma área de deposição de sedimentos, sendo que os maiores depósitos foram registrados próximo à calha, principalmente após eventos com maior fluxo de água (Figura 45b). Cantón et al. (2001) comentam que cursos com ordem superior à segunda, e com baixos gradientes de declividade são mais facilmente preenchidos por camadas de sedimentos, estando disponíveis para serem carregados por grandes eventos. Essa unidade apresenta também a maior área de drenagem (2,8 ha), convergindo para aumento da descarga líquida e sólida, entretanto essa mostrou-se com menor produção de sedimentos em comparação a B1 e B2 conforme Figura 42. Esse fato se explica pelo deslocamento da calha parshall como já discutido na seção material e métodos. Com a nova posição (a jusante da posição anterior), a calha passou a receber contribuição de um outro curso, o qual passou a ser o principal. No momento da mudança a equipe não atentou para a necessidade da mudança também do coletor de sedimento, e assim a calha registrou um volume diferente daquele que passava pelo coletor de sedimento, não podendo, portanto, ser analisado.



Figura 45 – Fluxo de água (a) e depósito de sedimentos próximo à calha Parshall da microbacia B3 (b).

As diferenças nas características hidrológicas, edáficas e cobertura vegetal atuando em conjunto nas quatro microbacias, explicam a variação no balanço de sedimentos. De todas as microbacias avaliadas B3 mostrou-se com maior propensão na produção de descargas líquidas (Tabela 14) e, embora não fique claramente evidenciado na Figura 42, coletas manuais de sedimentos sobre a calha na microbacia B3 e observações de campo (Figura 45b) mostram um padrão elevado de transporte e deposição de sedimento nessa unidade quando comparado a B2 e B4, e até mesmo superior a B1, que teve parte de sua cobertura vegetal removida. Se por um lado, devido à baixa condutividade hidráulica saturada nas camadas superficiais e subsuperficiais em B3 (Tabela 9), o escoamento superficial torna-se facilitado, por outro lado o suave declive favorece a redução da energia cinética do fluxo e aumento do depósito de sedimentos em vários pontos da bacia, particularmente próximo à calha (Figura 45b).

A unidade experimental B4 mostrou-se com o menor padrão de produção de sedimentos. Esta apresenta uma camada superficial de solo, com alta condutividade hidráulica, quando comparada às outras unidades avaliadas, conferindo-lhe um maior poder de infiltração. No entanto, as camadas subsuperficiais voltam a ter características similares às outras microbacias, com drástica redução da condutividade hidráulica (Tabela 9), favorecendo o escoamento subsuperficial. Nessa microbacia, este tipo de escoamento, que dependendo da magnitude do evento e das condições de umidade antecedentes pode durar várias horas ou até mesmos dias, influencia na diluição do fluxo (GARCIA-RUIZ et al., 2008). Esse padrão de escoamento aliado à baixa concentração iônica inerente ao próprio solo, convergem para baixa concentração de sólidos. Devido às características de infiltração dessa unidade, as maiores concentrações de sólidos ocorrem somente em eventos intensos, como no dia 30/04

(Figura 42), em que o fluxo de alta magnitude, transporta para o canal principal parte do material depositado sobre a superfície do solo.

4.5.2 Produção de sedimentos por unidade de área nas microbacias

Observou-se uma tendência de alta produção de sedimentos para altos valores de erosividade das chuvas, evidenciando o poder desagregador da chuva no aumento da concentração de sedimentos (Figuras 46). Para o ano de 2009, a erosividade teve variação de $74 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$, conduzindo uma das menores produções de sedimentos do período (24 kg ha^{-1}), a $1114 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$ para o evento do dia 30/01/09, que mesmo sendo o evento de maior erosividade contabilizou uma baixa produção de sedimentos. Tal fato é explicado pelo alto valor de abstração inicial de água nos eventos iniciais de precipitação nas microbacias, conduzindo a um baixo volume escoado promovendo uma redução da produção de sedimentos. A maior produção individual de sedimentos para este ano aconteceu na microbacia experimental B2 para o evento do dia 30/04/09, sendo que este sozinho alcançou um patamar de 635 kg ha^{-1} . Eventos dessa magnitude, além de promover uma alta descarga sólida, acarretando prejuízos de caráter financeiro e ambiental pela saída desse recurso da bacia implicando em depleção de fertilidade, e ainda permite um efeito residual associado ao distúrbio do solo e deposição de sedimentos em áreas susceptíveis, com facilidade de arraste por eventos subsequentes.

O ano de 2009 foi caracterizado por um acumulado de precipitação superior à média, porém com chuvas bem distribuídas entre os meses de fevereiro a maio (Figura 27). Embora os valores de erosividade não tenham sido muito elevados no mês de abril, porém a alta produção de sedimentos neste mês sugere que devem ser tomadas medidas preventivas no sentido de proteger o solo da erosão hídrica neste período, corroborando com resultados de Albuquerque et al. (2005) que verificaram elevados valores de erosividades seguidos de maiores perdas de solos nos meses de março e abril. De acordo com Garfur et al. (2003), valores de I_{30} superiores a 25 mm h^{-1} podem ser considerados críticos quanto aos processos erosivos. De todos os eventos observados na Figura 46, apenas quatro tiveram intensidade máxima em trinta minutos (I_{30}) inferior a este limiar, sendo o evento do dia 13/04/09 (I_{30} de $18,7 \text{ mm h}^{-1}$) o de menor produção de sedimentos nas microbacias B1 e B2 para o ano de 2009, com valores de 9,6 e 10, kg ha^{-1} , respectivamente.

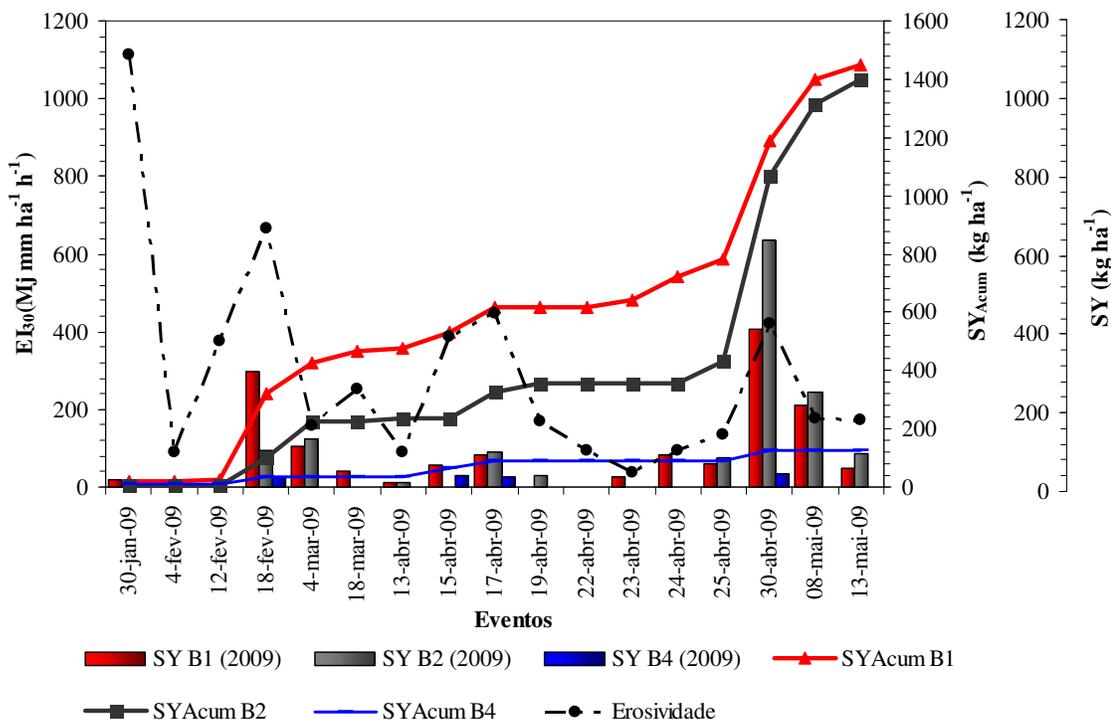


Figura 46 – Produção de sedimentos por hectare (SY) e valores de erosividade (EI₃₀) por evento, nas microbacias B1, B2 e B4 para a estação chuvosa de 2009.

Considerando a produção de sedimentos até o dia 25/04/09, constata-se na unidade experimental B2, mesmo apresentando área de drenagem maior, o que converge para um maior volume escoado e onde se espera uma maior produção de sedimentos, observa-se, no entanto uma produção de sedimentos menor quando comparada a B1. A diferença entre as duas microbacias fica evidente até aproximadamente 25/04/09, tendo B1 até então uma produção de 81,7% superior a B2, como resultado do tratamento aplicado. Até este momento a hipótese do incremento na produção de sedimentos como consequência das diferenças de uso da terra entre as bacias B1 e B2 se confirma. A partir de então, as diferenças diminuem, passando B2 a uma produção de sedimento próximo a B1. A produção total de sedimentos em B2 sofreu uma nítida influência dos últimos eventos, em especial do evento do dia 30/04. Embora este evento tenha sido bastante erosivo, acredita-se que além das características da precipitação e condições de umidade do solo, o aporte de sedimentos tenha também tido também contribuição de zonas desprotegidas em B2 (Figura 44). O arraste de sedimentos e sua deposição no final da bacia é um processo gradual, que leva tempo para atingir o canal principal e chegar à seção de controle.

A verificação do efeito do tratamento torna-se mais evidente para os primeiros eventos, principalmente o do dia 18/02. Até aproximadamente 25/04/09, embora o acumulado

de B1 tenha sido superior a B2, a produção de sedimentos em B1 manteve-se estável. Acredita-se que isso possa ter ocorrido como consequência da retenção de sedimentos devido à proteção do solo promovida pelo recrescimento da vegetação e também pela “limpeza” dos sedimentos deixados por eventos anteriores sobre a rede de drenagem. Considerando que o nível crítico de perda de solo para solos rasos esteja entre 2 a 5 ton ha⁻¹ ano⁻¹ (FAO 1965 apud GARGUR et al., 2003), e que o ano de 2009 apresentou precipitação bem distribuída e com valores de erosividade bem inferiores em relação a 2008 (Alves, 2008), os valores encontrados para o ano de 2009 lançam um alerta quanto a sustentabilidade, principalmente se estes níveis forem mantidos por vários anos. Mesmo com valores próximos a faixa considerada crítica, os resultados revelam produção de sedimentos bastante inferiores a de outros ecossistemas. (THOMAZ, 2009; KIMOTO et al., 2002).

A produção total de sedimentos nas unidades experimentais B1 e B2 em 2009 corresponde a 1,45 e 1,39 ton ha⁻¹, respectivamente, sendo estes valores superiores aos encontrados por Albuquerque, Lombardi Neto e Srinivasan (2001), que verificaram valores anuais máximos de 300 kg ha⁻¹ ano⁻¹ em microbacias com condição de Caatinga preservada em Sumé, PB. Em microbacias experimentais em Bangladesh na Índia, Gargur et al. (2003) observaram perdas médias de 1,2 ton ha⁻¹ ano⁻¹ em sistemas agrícolas de uso seguido e abandono da terra. Os resultados desse trabalho revelam, porém, que a produção de sedimentos nas microbacias B1 e B2 são bastante inferiores aos resultados oriundos de simulações empregando modelagem em grandes bacias hidrográficas. Silva e Santos (2008), por exemplo, encontraram produção de sedimentos média na ordem de 83 ton ha⁻¹ ano⁻¹ na bacia do rio Pirapama – PE, sendo este resulta aproximadamente 61 ordens de magnitude superior às microbacias B1 e B2, na estação chuvosa de 2009.

Torna-se importante ressaltar que devido ao irregular posicionamento do coletor de sedimentos (ver secção 4.5.1) da microbacia B3, estes apresentaram subestimativas, não sendo, portanto, analisados para o cômputo da produção total de sedimentos nesta unidade. De todas as microbacias analisadas, B4 apresentou um comportamento sedimentológico totalmente diferenciado das demais unidades. Houve nessa, apenas cinco eventos chuva-deflúvio com produção de sedimentos, sendo que o maior evento contabilizou um total de apenas 33,8 kg ha⁻¹. A produção de sedimentos manteve-se praticamente constante durante toda a estação chuvosa de 2009, sendo o valor acumulado de apenas 126,6 kg ha⁻¹. A microbacia B4, devido à peculiaridade com relação às características de solo, apresentou-se com baixa capacidade de retenção de água, alto poder de drenagem e redistribuição de água no perfil e baixa fertilidade natural (Tabela 6). Como consequência, houve nessa microbacia

uma maior propensão de formação de fluxos subsuperficial com reduzida carga de sedimentos, como uma capacidade maior de diluição. (GARCIA-RUIZ et al., 2008). Todas essas características atuando em conjunto foram determinantes na redução da erosão em B4, levando-a a um patamar de produção de sedimentos bem inferiores aos admissíveis.

4.5.3 Curvas chaves vazão máxima versus produção de sedimentos

Na ausência de dados medidos da concentração de sedimentos, geralmente usa-se curvas chaves para estimativas aproximadas da produção de sedimentos, o que requer a medição de ambos: vazão e produção de sedimentos. Na Figura 47 observa-se as curvas chave de eventos individuais para a estação chuvosa de 2009 nas microbacias B1, B2 e B4, respectivamente. Foram analisados um total de 28 eventos com produção de sedimentos nas quatro microbacias, nos quais quatorze deles foram registrados em B1, nove em B2 e apenas cinco eventos tiveram registro na unidade B4. Análises estatísticas revelaram os ajustes potencial e linear como sendo os de melhor aplicabilidade para explicar a variação da produção de sedimentos em função da descarga máxima observada. Nas microbacias B1, B2 o modelo ajustado de melhor desempenho foi o potencial, sendo este significativo com nível de 1% de significância com valor de F (valor de significância da equação) de 49,5 e 17 e R^2 de 0,80 e 68, respectivamente (Figuras 47).

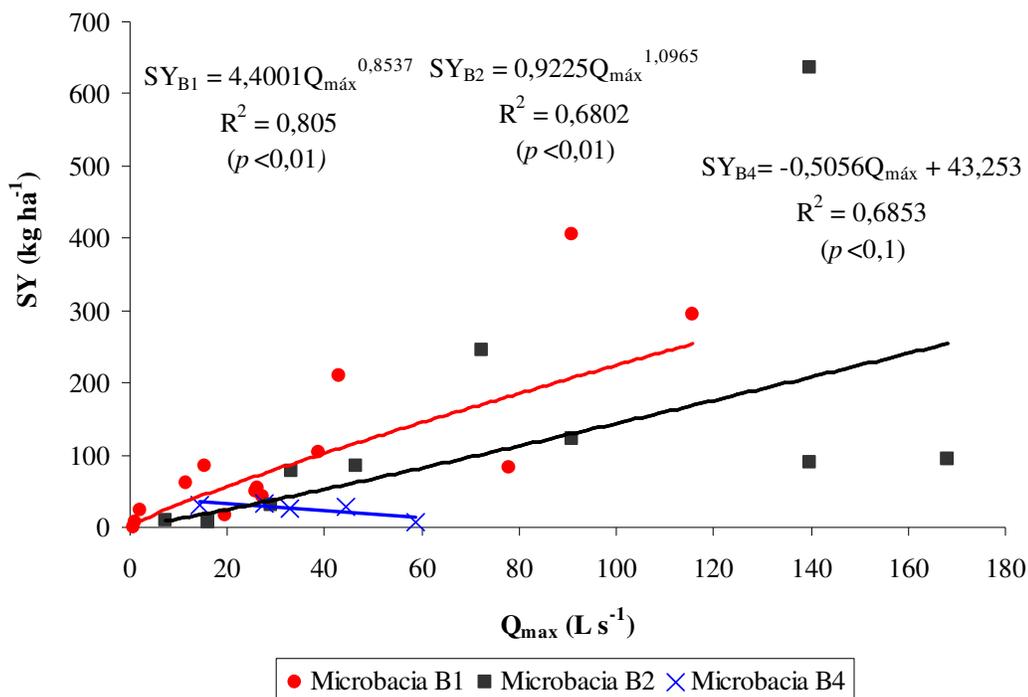


Figura 47 – Curva-chave para as microbacias experimentais: B1, B2 e B4 na estação chuvosa de 2009.

Na microbacia B4 o modelo de melhor ajuste foi o linear, sendo este significativo a 10% de significância, com valor de F de 6,53. Observou-se que a microbacia B4 mostrou um comportamento oposto ao das demais unidades quanto à relação entre vazão de produção de sedimentos. Nesta, a relação apresentou um caráter inverso, sendo as menores concentrações verificadas para os maiores picos de descarga. Acredita-se que este comportamento esteja associado às características físico-químicas dos solos dessa microbacia. Nessa unidade a fração areia prevalece sobre as quantidades de silte e argila (Tabela 6), como a concentração medida é formada principalmente pelas frações silte e argila em suspensão e os solos dessa microbacia são pobres nessa granulometria, ocorre que em vazões elevadas devido à baixa concentração de silte e argila, há uma tendência maior na diluição do fluxo do que em concentrá-lo. (GARCIA-RUIZ et al., 2008). O comportamento totalmente diferenciado dessa microbacia faz dela uma interessante unidade experimental para comparação de resultados, destacando que mesmo sobre condições climáticas similares, as respostas sedimentológicas podem ser totalmente diferenciadas dependendo das características edáficas encontradas no local.

Os valores da produção de sedimentos medidos e estimados, empregando os modelos da Figura 47, bem como os desvios percentuais entre ambos, encontram-se na Tabela 17. O sinal negativo nos desvios implica em subestimativa nos valores observados, sendo os demais valores indicativos de superestimativa. Os resultados revelaram variações de até 217,9% entre os valores medidos e estimados, sendo essa verificada para a produção de sedimentos estimada em B1. Essa unidade teve ainda dois outros eventos onde os dados observados foram altamente superestimados (04/02 e 17/03/09). Observa-se ainda, que quanto menor for o evento com relação a produção de sedimentos, mais imprecisas são as estimativas, principalmente para produção de sedimentos inferior a 60 kg ha^{-1} . Acredita-se ser o efeito do tratamento aplicado em B1 a fonte de maior variação das estimativas, conduzindo a alterações na resposta sedimentológica, dificultando dessa forma quantificações precisas sobre os valores observados. Pelos desvios percentuais da produção sedimentos de B2, verifica-se uma maior variação em comparação a B1, sendo o maior desvio verificado em 30/01 com superestimativa dos valores observados de 182,3%. Já em B4, mesmo sendo constatado o menor ajuste entre as bacias avaliadas ($R^2 < 0,6$), foi nessa em que se verificou estimativas mais precisas sobre a produção de sedimentos medida, com desvio máximo de 78,9%.

Torna-se importante enfatizar que os resultados obtidos são apenas preliminares e indicam somente tendências sobre a produção e estimativas de sedimentos que deixam essas unidades, sendo necessário um sequenciamento de monitoramento com obtenção de séries com número maior de registros. Todavia os resultados encontrados mostram-se de grande relevância na explicativa dos principais aspectos espaço-temporal dos sedimentos que deixam as bacias, bem como das respostas sedimentológicas em áreas com escoamento efêmero em regiões semiáridas, servindo de suporte para compreensão de processos e abertura para estudos posteriores. Contudo, devido à distinção nas repostas entre as bacias, fica evidente que os resultados de uma simples bacia não podem ser regionalmente extrapolados para outras vizinhas sem antes haver estudo detalhado sobre a conectividade entre elas e sobre as principais variáveis que atuam nos processos. Isso pode ser um problema em regiões semiáridas devido a incertezas climáticas associada à alta variabilidade temporal e espacial das características da precipitação (RODRIGUES et al., 2008) que atua diretamente sobre a produção de sedimentos.

Tabela 17 – Desvios percentuais e valores medidos e estimados da produção de sedimentos nas microbacias B1, B2 e B4 na estação chuvosa de 2009

Evento	B1			B2			B4		
	SY	SY _{est}	%	SY	SY _{est}	%	SY	SY _{est}	%
30-jan-09	17,66	56,14	217,92	6,94	19,59	182,31	7,61	13,62	78,97
04-fev-09	1,16	2,80	141,62	nda			nda		
12-fev-09	6,21	4,88	-21,35	nda			nda		
18-fev-09	295,75	254,26	-14,03	94,02	254,27	170,45	27,91	20,79	-25,50
04-mar-09	104,74	100,23	-4,31	123,26	129,50	5,06	nda		
17-mar-09	41,98	74,12	76,55	nda			nda		
13-abr-09	nda			10,23	8,35	-18,33	nda		
05-abr-09	54,78	71,80	31,06	nda			30,92	36,09	16,74
17-abr-09	83,10	181,17	118,01	89,33	207,49	132,28	26,26	26,70	1,68
09-abr-09	nda			30,90	37,11	20,09	nda		
23-abr-09	24,63	8,42	-65,80	nda			nda		
24-abr-09	84,28	45,65	-45,84	nda			nda		
25-abr-09	60,27	35,21	-41,57	76,78	43,14	-43,81	nda		
30-abr-09	406,37	206,85	-49,10	635,50	207,90	-67,29	33,88	29,37	-13,30
08-mai-09	209,78	108,92	-48,08	245,18	100,92	-58,84	nda		
13-mai-09	50,61	70,47	39,24	85,60	61,91	-27,67	nda		

nda – ausência de dados

* – desvios negativos indicam que os valores estimados subestimam os observados

5 CONCLUSÕES

- Ao início da estação chuvosa, devido às condições edáficas presentes, e pelo longo período sem chuvas na região, o escoamento superficial nas microbacias é dominado pela condição de pré-evento, sendo necessário um acumulado superior a cem milímetros para registro de eventos chuva-deflúvio;
- As modificações hidrológicas, devido à ação antrópica sobre a microbacia B1 tiveram influência somente sobre os primeiros eventos. O crescimento da cobertura vegetal herbácea após o tratamento, bem como os restos culturais deixados sobre o solo, reduziram o escoamento superficial pelo aumento da infiltração;

- Apesar da importante participação da intensidade sobre as modificações nas respostas hidrológicas em todas as microbacias, a umidade antecedente do solo desempenhou o papel principal sobre escoamento e produção de sedimentos nas unidades avaliadas;
- Apesar da proximidade entre as microbacias, as respostas hidrológicas foram significativamente diferenciadas em todas elas, com os maiores valores de escoamento superficial e picos de descarga sendo verificados em B3 e os menores encontrados sobre a unidade experimental B4;
- Mesmo sobre condições climáticas similares, o comportamento hidrossedimentológico pode apresentar profundas modificações dependendo da diferenciação de solo encontrado no lugar;
- Mudanças nas condições de uso da terra proporcionaram alterações na produção de sedimentos, sendo os efeitos maiores no início da estação chuvosa, onde a vegetação ainda não recobre o solo em sua totalidade;
- Os resultados encontrados fornecem elementos importantes sobre escoamento superficial e erosão hídrica sobre microbacias de escamento efêmero, servindo de base para nortear pesquisas futuras com enfoque sobre estes temas, ou servir de auxílio para outros temas ligados à hidrologia de regiões semiáridas.

6 RECOMENDAÇÕES

Como forma de aperfeiçoar as análises dos processos chuva-deflúvio e produção de sedimentos nas microbacias experimentais de Iguatu-CE, recomenda-se:

- Monitoramento contínuo do conteúdo de água no solo, inclusive em profundidade, pois as alterações nas respostas hidrológicas nas microbacias são fortemente influenciadas por essa variável;
- Caracterização completa das características físico-químicas dos solos, incluindo determinações da estrutura e mineralogia;
- Investigações mais detalhadas sobre os tipos de escoamentos presentes, com necessidade de emprego de traçadores naturais ou artificiais;
- Análise sistemática e criteriosa das propriedades do mineral argila e de sua influência nos processos de erosão e produção sedimentos;
- Estudos específicos sobre tempo de concentração (T_c) em pequena escala, considerando fatores não somente fatores estáticos, mas também dinâmicas como a intensidade de chuva, pois o T_c é um fator que pode variar dependendo das características da precipitação;
- Adaptação dos equipamentos de coleta de sedimentos, evitando perda de dados por entupimentos, ou mesmo emprego de outros sistemas com coletas que permitam o armazenamento de um volume amostral maior;
- Devido à verificação da influência das magnitudes dos eventos anteriores na participação do depósito de sedimentos na rede de drenagem e consequente modificações das respostas sedimentológicas por eventos posteriores, recomendam-se estudos mais detalhado sobre conectividade entre eventos;

- Como forma de aumentar a espacialização e confiabilidade dos resultados obtidos, recomenda-se monitoramento contínuo dos processos chuva-deflúvio nas microbacias objeto de pesquisa, com a geração de uma série maior de dados, e também a instalação de outras unidades experimentais com características similares, onde seja possível o comparativo hidrológico que permita de forma satisfatória a extrapolação dos resultados;
- Emprego de técnica multivariada envolvendo diferentes variáveis como: umidade atual do solo, umidade antecedente do solo, características da precipitação (duração, intensidade), como suporte para determinar e explicar os principais processos hidrológicos atuantes;
- Recomenda-se também a modelagem hidrológica, para que os dados disponíveis, e os que venham a ser coletados em pesquisas futuras, sejam empregados para calibração, validação e/ou desenvolvimento de novos modelos com maior aplicabilidade e representatividade para microbacias com escoamento efêmero em regiões semiáridas.

REFERÊNCIAS

ALBUQUERQUE, A. W.; GILSON FILHO, M.; SANTOS, J. R.; COSTA, J. P. V.; SOUZA, J. L. Determinação de fatores da equação universal de perda de solo em Sumé, PB. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 9, n. 2, p. 153-160, 2005.

ALBUQUERQUE, A. W.; LOMBARDINI NETO, F.; SRINIVASAN, V. S. Efeito do desmatamento da Caatinga sobre as perdas de solo e água de um Luvissole em Sumé, PB. **Revista Brasileira de Ciência do solo**, Campina Grande, v. 25, p. 121-128, 2001.

ALBUQUERQUE, A. W.; LOMBARDINI NETO, F.; SRINIVASAN, V. S.; SANTOS, J. R. Manejo da cobertura do solo e de práticas conservacionistas nas perdas de solo e água em Sumé, PB. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 6, n. 1, p. 136-141, 2002.

ALENCAR, D. B. S.; SILVA, C. L.; OLIVEIRA, C. A. Influência da precipitação no escoamento superficial em uma microbacia hidrográfica do Distrito Federal. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 26, n. 1, p. 103-112, 2006.

ALVES, N. N. L. **Caracterização de micro-bacia hidrográfica experimental no semi-árido brasileiro como suporte a estudos da degradação**. 2008. 77 f. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) – Departamento de Engenharia Agrícola, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2008.

ARAÚJO, J. C.; PIEDRA, J. I. G. Comparative hydrology: analysis of a semiarid and a humid tropical watershed. **Hydrological Processes**, v. 23, p. 1169–1179, 2006.

ASCE. **Hydrology Handbook: Manuals and reports on Engineering Practice**. 2. ed. American Society of Civil Engineers (ASCE), New York, USA, 1996, 784 p.

BARBOSA, H. A.; HUETI, A. R.; BAETHGEN, W. E. A 20 – year study of NDVI variability over the Northeast Region of Brazil. **Journal of Arid Environments**, v. 67, p. 288-307, 2006.

BARTLEY, R.; ROTH, C. H.; LUDWIG, J.; MACJANNET, D.; LIEDLOFF, A.; CORFIELD, J.; HAWDON, A.; ABBOTT, B. Runoff and erosion from Australian's tropical semi-arid rangelands: influence of ground cover for differing space and time scale. **Hydrological Processes**, v. 20, p. 3317–3333, 2006.

BATTANY, M.C.; GRISMER, M. E. Rainfall runoff erosion in Napa Valley vineyards: effects of slope, cover and surface roughness. **Hydrological Processes**, v. 14, p. 1289–1304, 2000.

BERNARDO, S.; SOARES, A. A.; MANTOVANI, E. C. **Manual de Irrigação**. 8.ed. Viçosa: UFV, 2006, 625 p.

BROOKS, K. N.; FOLLIOTT, P. F.; GREGERSEN, H. M.; THAMES, J. L. **Hydrology and the Management of Watersheds**. Iowa State University, 1991, 392 p.

CANAFÍSTULA, F. J. F.; TEIXEIRA, A. S.; SANTOS, C. C.; ALVES, N. N.; NUNES FILHO, J. L. N.; DAHER, S. Development and application of an automatic hidrological station for monitoring first and second order watersheds. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 37, 2008, Foz do Iguaçu – PR. **Anais...** Porto Alegre – RS: SBEA, 2008.

CANTÓN, Y.; DOMINGO, F.; SOLÉ-BENET, A.; PUIGDEFÁBREGAS, J. Hydrological and erosion response of a badland system in semiarid SE Spain. **Journal of Hydrology**, v. 252, p. 65-84, 2001.

CARVALHO, N. O. **Hidrosedimentologia Prática**. CPRM, Rio de Janeiro, 1994, 372 p.

CEBALLOS, A.; SCHNABEL, S. Hydrological behaviour of a small catchment in the dehesa landuse system (Extremadura, SW Spain). **Journal of Hydrology**, v. 210, p. 146-160, 1998.

CHOW, V. T.; MAIDMENT, D. R.; MAYS, L. W. **Applied Hydrology**. McGRAWHILL International Editions: Civil Engineering Series, Singapura, 1988, 572 p.

COSTA, A. C. **Hidrologia de uma bacia experimental em área conservada no semi-árido brasileiro**. 2007. 166f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2007.

COSTA, M. H.; BOTTA, A.; CARDILLE, J. A. Effects of large-scale changes in land cover on the discharge of the Tocantins River, Southeastern Amazonia. **Journal of Hydrology**, v. 283, p. 206-217, 2003.

CROCKFORD, R. H.; RICHARDSON, D. P. Partitioning of rainfall into throughfall, stemflow and interception: effect of forest type, ground cover and climate. **Hydrological Processes**, v. 14, p. 2903–2920, 2000.

CRUZ, T. M. L.; TEIXEIRA, A. S.; CANAFÍSTOLA, F. J. F.; SANTOS, C. C.; NUNES FILHO, J. L. N.; MESQUITA, P. E. G. Ensaio de um sensor capacitivo como medidor de nível de água. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 36, 2007, Bonito – MS. **Anais...** Porto Alegre – RS: SBEA, 2007.

DE VENDE, J.; POESEN, J.; VERSTRAETEN, G.; ROMPAEY, A. V.; GOVERS, G. Spatially distributed modelling of soil erosion and sediment yield at regional scales in Spain. **Global and Planetary Change**, v. 60, p. 393-415, 2008.

DUNNE, T.; LEOPOLD, L. B. **Water in Environment Planning**. W. H. Freeman and Company, New York, 1978, 818 p.

EMPRESA NACIONAL DE PESQUISA AGROPECUÁRIA EMBRAPA. **Manual de métodos de análise de solo**. 2.ed. Rio de Janeiro, Centro Nacional de Pesquisa de Solos, 1997, 212 p.

FALKENMARK, M.; CHAPMAN, T. **Hidrologia comparada: um enfoque ecológico a los recursos hídricos y de suelo**. UNESCOCEDEX: Madrid, 1993, 491 p.

FARIAS, T. R. L. **Produção de sedimentos em bacias hidrográficas sob diferentes contextos geoambientais: Medida e Modelagem**. 2008, 110 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2008.

FELFILI, J. M.; CARVALHO, F. A.; HAIDAR, R. F. **Manual para monitoramento de parcelas permanentes nos biomas Cerrado e Pantanal**. Brasília, 2005, 51 p.

FUNCEME, **Séries pluviométricas do posto Iguatu – Ce (1974 – 2008)**. Disponível em: <<http://www.funceme.br/>>. Acesso em: 30 jan. 2009.

GAISER, T.; KROL, M.; FRISCHKORN, H.; ARAÚJO, J. C. **Global Change and Regional Impacts**. Springer Verlag, Berlin, 2003, 428 p.

GARCIA-RUIZ, J. M.; REGUÉS, D.; ALVERA, B.; LANA-RENAULT, N.; SERRANO-MUELA, P.; NADL-ROMERO, E.; NAVAS, A.; LATRON, J.; MARTÍ-BONO, C. ARNÁEZ, J. Flood generation and sediment transport in experimental catchments affected by land use changes in the central Pyrenees. **Journal of Hydrology**, v. 274, p. 30-46, 2006.

GARFUR, A.; JENSEN, J. R.; BORGGAARD, O. K.; PETERSEN, L. Runoff and losses of soil and nutrients from small watersheds under shifting cultivation (Jhum) in the Chittagong Hill Tracts of Bangladesh. **Journal of Hydrology**, v. 274, p. 30-46, 2003.

GERMER, S.; CHRISTOPHER, N.; VETTER, T.; CHAVES, J.; KRUSCHE, A. V. Implications of long-term land-use change for the hydrology and solute budgets of small catchments in Amazonia. **Journal of Hydrology**, v. 364, p. 349-363, 2009.

GHIDIN, A. A.; MELO, V. F.; LIMA, V. C.; LIMA, J. M. J. C. Topossequências de Latossolos originados de rochas basálticas no Paraná. II – relação entre mineralogia da fração argila e propriedades físicas dos solos. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, Viçosa, v. 30, p. 307-319, 2006.

GOLDENFUN, J. A. Pequenas Bacias Hidrológicas: Conceitos Básicos. In: Paiva, J.B.D.; Paiva, E.M.C.D. (org.). **Hidrologia aplicada à gestão de pequenas bacias hidrográficas**. Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2001, p. 33-112.

GORDON, N. D.; MCMAHON, T. A.; FINLAYSON, B. L. **Stream Hydrology an Introduction for Ecologists**. Jonh Wiley & Songs Ltd, England, 1992, 526 p.

HAAN, C.T.; BARFIELD, B.J.; HAYES, J.C. **Design Hydrology and Sedimentology for Small Catchments**. Academic Press, San Diego, 1993, 588 p.

HOROWITZ, A. J. An evaluation of sediment rating curves for estimating suspended sediment concentrations for subsequent flux calculations. **Hydrological Processes**, v. 17, p. 3389–3409, 2003.

HORTON, R. E. Erosional development of streams their drainage basins: hydrophysical approach to quantitative morphology. **Bulletin of the Geological Society of American**, v.56, p. 275-370, 1945.

IPECE - **Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Ceará**. Perfil básico municipal. Iguatu. 2004.

IROUMÉ, A.; MAYEN, O.; HUBER, A. Runoff and sediment peak flow responses to timber harvest and forest age in southern Chile. **Hydrological Processes**, v. 20, p. 37–50, 2006.

KANG, S.; ZHANG, L.; SONG, X.; ZHANG, S.; LIU, X.; LIANG, Y.; ZHENG.; S. Runoff and sediment loss responses to rainfall and land use in two agricultural catchments on the Loess Plateau China. **Hydrological Processes**, v. 15, p. 977–988, 2001.

KIEHL, E. J. **Manual de edafologia: relações solo planta**. São Paulo: Ceres, 1979, 262 p.

KIMOTO, A.; UCHIDA, T.; MIZUYAMA, T.; CHANGHUA, L. Influence of human activities on sediment discharge from devastated weathered granite hills of southern China: effects of 4-years elimination human activities. **CATENA**, v. 48, p. 217-233, 2002.

KÖPPEN, W. **Climatologia: con un estudio de los climas de la tierra**. Fondo de cultura Econômica. México, 1948, 479 p.

KOHNKE, H. **Soil Physics**. McGrawhill, New York, 1968, 224 p.

KRAEMER, G. B. **Variabilidade espacial dos atributos do solo na delimitação das unidades de mapeamento**. 2007. 87f. Dissertação (Mestrado em Ciências do Solo) – Departamento de Ciências do Solo, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2007.

LADO, M.; BEN-HUR, M. Soil mineralogy effects on seal formation, runoff and soil loss. **Applied Clay Science**, v. 24, p. 209–224, 2004.

LOBATO, F. A. O. **Perdas de solo e nutrientes por erosão hídrica para diferentes alturas pluviométricas em área de Caatinga do Ceará**. 2008. 56f. 2008. Monografia (Graduação em Agronomia) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2008.

LOPES, B. L. **Deposição e decomposição de serrapilheira em área da Caatinga cearense**. 2008. 68f. Monografia (Graduação em Agronomia) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2008.

MACHADO, R. E. **Simulação de escoamento e de produção de sedimentos em uma microbacia hidrográfica utilizando técnicas de modelagem e geoprocessamento**. 2002. 154f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Departamento de Engenharia Agrícola, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, 2002.

MEDEIROS, P. H. A. **Medida e modelagem da interceptação em uma bacia experimental do semi-árido**. 2005. 70f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2005.

MELLO, C. R.; LIMA, J. M.; SILVA, A. M. Simulação do deflúvio em microbacia hidrográfica com escoamento efêmero. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 11, n. 4, p. 410-419, 2003.

MILTON, J. S. **Statistical methods in the biological and health sciences**. 2.ed. New York: McGraw-Hill, 1992, 526 p.

MUGABE, F. T.; HODNETT, M.; SENZANJE, A. Comparative hydrological behaviour of two small catchments in semi-arid Zimbabwe. **Journal of arid environment**, v. 69, p. 599–616, 2007.

PALÁCIO, H. A. Q. **Índice de qualidade das águas na parte baixa da bacia hidrográfica do rio Trussu Ceará**. 2004. 96 f. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) – Departamento de Engenharia Agrícola, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2004.

PIVELI, R. P.; KATO, M. T. **Qualidade das águas e poluição: aspectos físico-químicos**. São Paulo: ABES, 2005, 285 p.

PONCE, V. M. Management of droughts and floods in the semiarid Brazilian northeast. The case for conservation. **Journal of Soil and Water Conservation**, v.50, n.5, p.422-431, 1995.

PONCE, V. M. **Engineering Hydrology**. Prentice Hall, New Jersey, 1989, 640 p.

PRUSKI, F. F.; BRANDÃO, V. S.; SILVA, D. D. **Escoamento Superficial**. Viçosa: UFV, 2. ed, 2004, 86 p.

RODRIGUES, J. O.; ANDRADE, E. M.; OLIVEIRA, T. S.; LOBATO, F. A. Equações de Intensidade-Duração-Frequência de chuvas para as localidades de Fortaleza e Pentecoste, Ceará. **Scientia Agrária**, v. 9, n. 4, p. 511-519, 2008.

RODRIGUES, V. A.; CARDOSO, L. C.; GOMES, L. N.; BARROS, Z. X.; CAMPUS, S. Receptores de GPS de três precisões e estação total na caracterização de cotas básicas para projetos rurais. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 26, n. 1, p. 208-214, 2006.

SANTOS, A. F. M. S.; FILL, H. D.; SUGAI, M. R. S.; BUBA, H.; KISHI, R. T.; MARONE, E.; LAUTERT, L. F. C. **Hidrometria Aplicada**. LACTEC – Instituto de Tecnologia para o desenvolvimento, Curitiba, 2001, 372 p.

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

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

SILVA, P. M. O. **Modelagem do escoamento superficial e da erosão hídrica na sub-bacia hidrográfica do Ribeirão Marcela, Alto Rio Grande**. 2006. 155f. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) – Departamento de Engenharia, Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2006.

SILVA, M. A. S.; MAFRA, A. L.; ALBUQUERQUE, J. A.; BAYER, C.; MIELNICZUK, J. Atributos físicos do solo relacionados ao armazenamento de água em um Argissolo Vermelho sob diferentes sistemas de preparo. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 35, n. 3, p. 544-552, 2005.

LAL, R. **Soil Erosion: Research Methods**. Soil and Water Conservation Society and St. Lucie Press, Florida, 1994, 340 p.

SRINIVASAN, V. S.; SANTOS, C. A. G.; GALVÃO, C. O. Erosão hídrica do solo brasileiro: A experiência da Bacia Experimental de Sumé. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 8, n. 2, p. 57-73, 2003.

SUDEC. **Levantamento de reconhecimento semidetalhado dos solos da Região dos Inhamuns – Salgado. Parte I - Iguatu**, Fortaleza, 1980, 192 p.

THOMAZ, E. L. The influence of traditional steep land agricultural practices on runoff an soil loss. **Agricultural, Ecosystem and environment**, v. 130, p. 23-30, 2009.

TUCCI, C. E. M.; CLARCK, R. T. Impactos das mudanças da cobertura vegetal no escoamento: Revisão. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 2, n. 1, p. 135-152, 1997.

TUCCI, C. E. M. Escoamento superficial. In: Tucci, C.E.M. (org.) **Hidrologia: ciência e aplicação**. 4. ed. Porto Alegre: ABRH/ Editora UFRGS, 2007, p. 391-441.

VILLELA, S. M.; MATTOS, A. **Hidrologia aplicada**. São Paulo: Mcgraw-Hill do Brasil, 1975, 245 p.

XAVIER, T. M. B. S. **Tempo de Chuva: Estudos Climáticos e de Previsão para o Ceará e Nordeste Setemtrional**. Fortaleza: ABC Editora, 2001, 476 p.

ZIEGLER, A. D.; NEGISHI, J. N.; SIDLE, R. C.; NOGUCHI, S.; NIK, A. R. Impacts of logging disturbance on hillslope saturated hydraulic conductivity in a tropical forest in Peninsular Malaysia. *CATENA*, v. 67, p. 89-104, 2006.

Livros Grátis

(<http://www.livrosgratis.com.br>)

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)
[Baixar livros de Matemática](#)
[Baixar livros de Medicina](#)
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)
[Baixar livros de Meteorologia](#)
[Baixar Monografias e TCC](#)
[Baixar livros Multidisciplinar](#)
[Baixar livros de Música](#)
[Baixar livros de Psicologia](#)
[Baixar livros de Química](#)
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)
[Baixar livros de Serviço Social](#)
[Baixar livros de Sociologia](#)
[Baixar livros de Teologia](#)
[Baixar livros de Trabalho](#)
[Baixar livros de Turismo](#)