

UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA
PROGRAMA DE PÓS - GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA

JOSÉ RIBEIRO DE ARAÚJO NETO

EFEITO DE DIFERENTES MANEJOS SOBRE O ESCOAMENTO SUPERFICIAL
EM MICROBACIAS EXPERIMENTAIS NO SEMIÁRIDO TROPICAL

FORTALEZA

2012

JOSÉ RIBEIRO DE ARAÚJO NETO

EFEITO DE DIFERENTES MANEJOS SOBRE O ESCOAMENTO SUPERFICIAL EM
MICROBACIAS EXPERIMENTAIS NO SEMIÁRIDO TROPICAL

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola do Centro de Ciências Agrárias, da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Agrícola.

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

Orientadora: Prof^ª. Eunice Maia de Andrade, Ph.D.

FORTALEZA

2012

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca de Ciências e Tecnologia

-
- A687e Araújo Neto, José Ribeiro de.
 Efeito de diferentes manejos sobre o escoamento superficial em microbacias experimentais no semiárido tropical. / José Ribeiro de Araújo Neto – 2012.
 128 f. : il. color., enc. ; 30 cm.
- Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências Agrárias, Departamento de Engenharia Agrícola, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Fortaleza, 2012.
 Área de Concentração: Manejo e Conservação de Bacias Hidrográficas no Semiárido.
 Orientação: Profa. PhD. Eunice Maia de Andrade
1. Escoamento Superficial. 2. Ação Antrópica. 3. Modelagem Hidrológica. 5. Modelo CN-NRCS.
 I. Título.

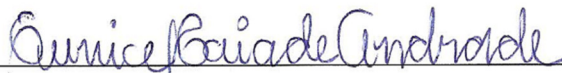
JOSÉ RIBEIRO DE ARAÚJO NETO

EFEITO DE DIFERENTES MANEJOS SOBRE O ESCOAMENTO SUPERFICIAL EM
MICROBACIAS EXPERIMENTAIS NO SEMIÁRIDO TROPICAL

Dissertação submetida à Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, 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.

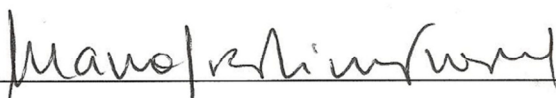
Aprovada em: 05 de Dezembro de 2012.

BANCA EXAMINADORA



Prof.^a. Ph.D. Eunice Maia de Andrade (Orientador)

Universidade Federal do Ceará – UFC



Prof.^a. Ph.D. Maria João Simas Guerreiro (Conselheiro)

Universidade Fernando Pessoa - UFP



Dr. Alexandre Cunha Costa (Conselheiro)

Pesquisador da Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos – FUNCEME

A Deus, por ter me proporcionado forças em todos os momentos; Aos meus pais, Antonio Wilson de Araújo (in memoriam) e Maria Cilenir Holanda de Araújo, por estarem sempre presentes na minha vida; Á minha irmã, por toda ajuda e pelo carinho; Aos meus familiares, em especial minha vizinha, aos parentes e amigos, e a todos os que estiveram ao meu lado durante essa caminhada.

DEDICO

AGRADECIMENTOS

A Deus em primeiro lugar, por se fazer presente em todos os momentos da minha vida.

Aos meus pais, Maria Cilenir Holanda e Antônio Wilson de Araújo (*in memoriam*), que são minha fonte de inspiração e motivação diária. À minha irmã, Maria Ciliane Holanda, por toda sua ajuda e aos demais membros da família tios, tias primos, primas, avós, em especial minha vizinha, que sempre apoiam minhas escolhas e me incentivam a lutar por minhas metas.

À Universidade Federal do Ceará (UFC), através do Programa de Pós – Graduação em Engenharia Agrícola, por ter concedido a oportunidade de cursar o Mestrado.

A Professora Ph.D. Eunice Maia de Andrade, minha Orientadora por quem tenho enorme respeito, e aos demais professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola – UFC: José Carlos de Araújo, Luiz Alberto Mendonça, Adunias Teixeira, Claudivam Feitosa, Omar Pereira, Marcus Bezerra, George Mamede, Julien e Camboim.

Aos demais membros da banca examinadora: Maria João Simas Guerreiro e Alexandre Cunha Costa.

À professora Dra. Helba Araújo de Queiroz Palácio, orientadora da graduação e hoje companheira de Trabalho no IFCE, Iguatu por tudo que já fez por mim e por muitos outros, sempre estimulando o crescimento profissional dos seus filhos, como ela chama os alunos por ela orientados de maneira direta ou indireta.

À professora Dra. Ana Célia Maia Meireles pelos por todos os ensinamentos científicos que serão levados para sempre na minha carreira profissional.

Ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará – Campus Iguatu que através do Curso Superior de Tecnologia em Irrigação e Drenagem e todos os professores que fazem parte desta instituição. Em especial, ao Laboratório de Água, Solo e Tecidos Vegetais - LABAS, da qual hoje faço parte como servidor, em nome dos servidores Adriano Erique de Oliveira Lima, Germano Elias Gomes e José Wellington Canuto Lima.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), agradeço pela bolsa de estudos concedida, que viabilizou o desenvolvimento desta pesquisa.

Ao Laboratório de Eletrônica e Mecânica Agrícola (LEMA), em nome do professor Adunias dos Santos Teixeira e Francisco José Firmino Canafístula, pela confecção e manutenção dos equipamentos da área de pesquisa.

Aos colegas antigos e novos do Grupo de Pesquisa MASSA em Fortaleza e em Iguatu pela amizade que será levada para sempre: Amauri, Ana Célia, Adriana Alves, Bergson, Carol, Cleiton, Cleisce, Cleene, Deodato, Eveline, Emanuel, Fernando, Fredson, Gean, Helba, Joseilson, Josivânia, José Ailton, Júlio César, Josivânia, Jairo, Kevin, Kelly, Lécio, Luana, Luizinho, Lobato, Márcio, Meilla, Monaliza Sales, Naiara Sâmia, Rafael, Paulilo, Samuel, Zezim.

Aos amigos da turma de Mestrado em Engenharia Agrícola: Everton, Amauri, José Wellington, Artênio Cabral, Berthier, Jonathan, Marcos Neves.

Em especial aos bolsistas de Graduação do curso de Tecnologia em Irrigação e Drenagem – TID do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará, Campus Iguatu – IFCE, pelo grande companheirismo e apoio logístico a esta pesquisa.

RESUMO GERAL

ARAÚJO NETO, José Ribeiro de, Universidade Federal do Ceará. Dezembro de 2012. **Efeito de diferentes manejos sobre o escoamento superficial em microbacias experimentais no semiárido tropical.** Orientadora: Eunice Maia de Andrade. Examinadores: Maria João Simas Guerreiro e Alexandre Cunha Costa.

Sobre condições de chuva natural com características similares no que se refere à lâmina total precipitada, duração e intensidade, microbacias com escoamento efêmero em regiões semiáridas, podem ou não apresentar respostas hidrológicas diferenciadas, como consequência da intervenção humana. O objetivo deste estudo foi investigar a influência antrópica sobre as repostas hidrológicas em microbacias de escoamento efêmero no bioma Caatinga, bem como, gerar informações das principais variáveis hidrológicas envolvidas no processo de chuva-deflúvio e avaliar o escoamento superficial para essas microbacias por meio do modelo hidrológico CN-NCRS. Os dados analisados foram referentes às estações chuvosas dos anos de 2009 à 2012. Foram monitoradas a hidrologia de três microbacias, a cobertura vegetal foi mantida inalterada na primeira microbacia enquanto que na segunda foi aplicado o manejo de raleamento para produção de pastagem e a terceira aplicou-se o manejo de corte/queima e plantação da gramínea (*Andropogongayanus*, Kunt) para produção de pasto. Os resultados mostraram que o manejo da vegetação influencia na geração de escoamento nas microbacias refletindo no número de eventos chuvosos geradores de escoamento, no total escoado, no pico de vazão, assim como nos valores de CN (Curve Number) calibrados e validados. Foram detectados 198 eventos com chuva nas microbacias durante o período de estudo, sendo que desses, 75 eventos geraram escoamento superficial para a microbacia com vegetação nativa o que produziu um coeficiente de escoamento anual médio de 9,0%, já a microbacia com vegetação raleada 62 eventos geraram escoamento superficial sendo o coeficiente de escoamento anual médio 5,6%. Os menores valores escoamentos para a microbacia com vegetação raleada sugere um manejo adequado para a produção de pastagem no semiárido, uma vez que produz pastagem e reduz as perdas de água por escoamento superficial em comparação com a microbacia com vegetação nativa. A prática de corte/queima com pastagem, tornou o solo mais exposto, proporcionando assim maiores escoamentos. Os valores de CN calibrados e validados foram: 75,4 para a microbacia com vegetação nativa; 72,3 para a microbacia com vegetação raleada e 88,5 microbacia com o manejo com corte/queima e plantação de pastagem. Tanto na calibração como validação os modelos apresentaram bons coeficientes de Nash e Sutcliffe superiores a 0,6, bem como, índices de confiança de bom a muito bom. Os CN calibrados e validados podem ser usados para estimativa do escoamento superficial em condições similares de manejo da caatinga no semiárido brasileiro. Ainda, o modelo CN-NRCS apresentou maior sensibilidade às alterações nos valores do CN do que para alterações na razão λ . Observou-se uma baixa confiabilidade para o modelo, em virtude da variação temporal dos parâmetros e ainda influenciado pela sensibilidade dos parâmetros de entrada (CN e λ), bem como, das incertezas na variável de entrada precipitação.

Palavras-chave: Escoamento Superficial. Ação Antrópica. Modelagem Hidrológica. Modelo CN-NRCS.

GENERAL ABSTRACT

ARAUJO NETO, José Ribeiro de. Federal University of Ceará. December 2012. **Effect of different management on runoff in experimental watersheds in the semiarid tropical.** Advisor: Eunice Maia de Andrade. Examiners: Maria João Guerreiro Simas and Alexandre Cunha Costa.

On natural rainfall with similar characteristics in relation to total depth, duration and intensity, catchments with ephemeral runoff in semiarid regions, may or not present hydrological responses differentiated as a result of human intervention. The aim of this study was to investigate the anthropogenic influence on the hydrological responses of catchment of ephemeral runoff in Caatinga biome, as well as generate information of the key hydrological variables involved in the rainfall-runoff and investigate the runoff of these catchments through the hydrological model CN-NCRS. The data were analyzed concerning the rainy seasons of the years 2009, 2010, 2011 and 2012. We monitored the hydrology of three catchments, in the first one vegetal cover was kept unchanged, in the second one vegetal cover was thinned for forage yield and the third one was applied the management of vegetation cutting/burning and planted a grass (*Andropogon gayanus*, Kunt). The results present that the vegetation management influences the generation of runoff in the catchments reflecting on the number of rainfall events generators of runoff, total runoff, runoff peak, and the values of CN (curve number) calibrated and validated. 198 events were detected with rain in the watershed during the study period, and of these, 75 events generated runoff for the watershed with native vegetation which produced an average annual runoff coefficient of 9.0%, since the watershed with vegetation thinned 62 events generated runoff and the runoff coefficient average annual 5.6%. The lesser runoff for the watershed with vegetation thinned regarding to that with vegetation unchanged, suggests appropriate management for the production of forage in the semiarid zones, since it produces forage and reduces water losses by runoff. The practice of vegetation cutting/burning associated with grasses made the soil more exposed, allowing larger runoff events. The values of CN were calibrated and validated: 75.4 for the watershed with native vegetation; 72.3 for the watershed with vegetation thinned and 88.5 with watershed management with cutting / burning and planting pasture. Both the calibration and validation models showed good Nash and Sutcliffe coefficients higher than 0.6, as well as confidence indices of good to very good.. The CN calibrated and validated may be used to estimate runoff in similar conditions of management in the semiarid Brazilian Caatinga. The model CN-NRCS presented greater sensitivity to changes in the values of CN than to changes in the ratio λ . The CN-NCRS model presented low reliability, because of the temporal variation of the parameters and its high sensitivity of the input parameters (CN and λ), as well as the uncertainties in the input variable precipitation.

Keywords: Runoff. Anthropic action. Hydrologic Modeling. CN-NRCS model.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Diagrama hidrológico de um evento chuvoso em uma porção de uma bacia hidrográfica.....	19
Figura 2 – Localização das microbacias experimentais no município de Iguatu, Ceará.....	32
Figura 3 – Representação do Modelo Numérico do Terreno (MNT) das microbacias: (a) microbacia com caatinga nativa; (b) microbacia com caatinga raleada e (c) microbacia com queima e plantação de pastagem.....	33
Figura 4 – Distribuição das classes de declividade das microbacias: (a) microbacia com caatinga nativa; (b) microbacia com caatinga raleada e (c) microbacia com queima e plantação de pastagem.....	34
Figura 5 – Série histórica mensal de precipitação pluviométrica no posto de Iguatu, Ceará, com as barras verticais representando a amplitude mensal para a série histórica entre 1974 e 2008.....	36
Figura 6 – Série histórica anual de precipitação pluviométrica no posto Iguatu no município de Iguatu, Ceará.....	36
Figura 7 – (a) Detalhe da estrutura do solo no período seco; (b) Condição de encharcamento dos solos no período chuvoso.....	39
Figura 8 – Áreas das microbacias com ausência de vegetação	40
Figura 9 – Aspectos da vegetação (a) no período chuvoso e (b) no período seco	41
Figura 10 – Visão parcial da condição da vegetação na microbacia com caatinga raleada (a) após o raleamento na estação seca e (b) na estação chuvosa subsequente ao raleamento	41
Figura 11 – Vegetação na microbacia raleada na estação chuvosa: (a) antes do tratamento e (b) depois do tratamento	42
Figura 12 – Vegetação na microbacia raleada na estação seca: (a) antes do tratamento e (b) depois do tratamento	42
Figura 13 – Visão das fases do manejo aplicado na microbacia (a) derrubada da vegetação nativa em 12/2009; (b) queima da vegetação em 09/12/2009; (c) plantio do capim em 15/01/2010; (d) desenvolvimento do capim em 27/04/2010	43
Figura 14 – Detalhe da cobertura morta da microbacia experimental mantida intacta.....	44
Figura 15 – (a) Detalhe do Pluviógrafo de báscula e (b) Pluviômetros do tipo Ville de Paris instalados nas microbacias.....	45
Figura 16 – (a) Confeção das calhas Parshall em fibra de vidro e (b) instalação em campo com estrutura de alvenaria	46
Figura 17 – Detalhe da calha Parshall instalada em campo, (a) visão geral, (b) em funcionamento	46
Figura 18 – Linígrafo de medição de nível do escoamento, (a) sensor capacitivo para monitoramento do nível de água e (b) poço tranquilizador onde é instalado o sensor de nível na calha Parshall	47
Figura 19 – Equipamento de medição de consutividade hidráulica saturara em campo (Amoozemeter).....	49
Figura 20 – Anéis instalados em campo para determinação da curva de infiltração pelo método do infiltrômetro de anel com carga variável.....	50

CAPÍTULO 1

Figura 1 – Mapas das microbacias experimentais no município de Iguatu, Ceará, Brasil.....	62
Figura 2 – Detalhes da vegetação herbácea nas microbacias experimentais no período chuvoso: (a) Caatinga – Vegetação nativa em 07-03-2011 (b) Vegetação raleada em 06-04-2009	64
Figura 3 – (a) Modelo do pluviógrafo e (b) calha Parshall instalados nas microbacias experimentais monitoradas em 19-03-2008.....	65
Figura 4 – Relação em os valores de lâmina escoada medida na microbacia nativa versus a lâmina escoada na microbacia raleada: (a) mensal e (b) eventos individuais.....	68
Figura 5 – Hidrogramas das microbacias nativa e raleada e características da precipitação para o evento do dia 29 de março de 2010.....	70
Figura 6 – Hidrogramas das microbacias nativa e raleada e características da precipitação para o evento do dia 28 de fevereiro de 2011	71
Figura 7 – Hidrogramas das microbacias nativa e raleada e características da precipitação para o evento do dia 01 de fevereiro de 2011	72
Figura 8 – Relação entre lâmina escoada e total precipitado na escala de evento para as microbacias: (a) vegetação nativa e (b) vegetação raleada.....	73
Figura 9 – Relação entre precipitação e umidade antecedente do solo para as microbacias: (a) nativa e (b) raleada.....	74
Figura 10 – Relação entre precipitação e intensidades específicas na microbacia com vegetação nativa.....	77
Figura 11 – Relação entre precipitação e intensidades específicas na microbacia com vegetação raleada.....	78

CAPÍTULO 2

Figura 1 – Localização das microbacias experimentais no Estado do Ceará.....	86
Figura 2 – Detalhes da vegetação nas microbacias experimentais: (a) B1 caatinga nativa; (b) B2 caatinga raleada e (c) B3 corte, queima e plantação da gramínea	88
Figura 3 – (a) Modelo do pluviógrafo e (b) calha Parshall instalados na microbacia experimental monitorada	89
Figura 4 – Valores de escoamento superficial medido e estimado atribuindo o CN calibrado para: (a) microbacia B1; (b) microbacia B2 e (c) microbacia B3.....	96

CAPÍTULO 3

Figura 1 – Mapas das microbacias experimentais no município de Iguatu, Ceará, Brasil....	107
Figura 2 – Detalhes da vegetação nas microbacias experimentais: (a) vegetação nativa em 07-03-2011 e (b) vegetação raleada em 06-04-2009	108
Figura 3 – (a) Modelo do pluviógrafo e (b) calha Parshall instalados nas microbacias experimentais monitoradas em 19-03-2008.....	109
Figura 4 – Método de análise de cada evento (HAWKINS et al., 2002) adaptado.....	110

Figura 5 – Relação entre a precipitação e a razão de abstração inicial: (a) microbacia com vegetação nativa e (b) microbacia com vegetação raleada	117
Figura 6 – Valores de precipitação efetiva medida e estimada para: (a) microbacia com vegetação nativa e $\lambda = 0,20$; (b) microbacia com vegetação nativa e $\lambda = 0,15$; (c) microbacia com vegetação raleada e $\lambda = 0,20$; e (d) microbacia com vegetação raleada e $\lambda = 0,18$	120
Figura 7 – Análise de sensibilidade do número de curva (CN) para a microbacia com vegetação nativa.....	124
Figura 8 – Análise de sensibilidade para da razão de abstração (λ) para a microbacia com vegetação nativa.....	125

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Valores médios do número de curva (CN) para bacias rurais	27
Tabela 2 – Características morfométricas das microbacias experimentais: caatinga nativa, caatinga raleada e queima com pastagem	35
Tabela 3 – Características climáticas para o município de Iguatu, Ceará	37
Tabela 4 – Dados de análise físico-química do solo das microbacias	38
Tabela 5 – Características da cobertura vegetal das microbacias ao longo do período estudado	40
Tabela 6 – Condutividade hidráulica saturada para as microbacias experimentais nativa e raleada	50

CAPÍTULO 1

Tabela 1 – Características morfométricas das microbacias experimentais estudadas	64
Tabela 2 – Síntese hidrológica das microbacias experimentais para o período de estudo (2009-2012)	66
Tabela 3 – Característica dos eventos para os hidrogramas selecionados	68

CAPÍTULO 2

Tabela 1 – Características morfométricas das microbacias experimentais: B1, B2 e B3	87
Tabela 2 – Valores do coeficiente de desempenho conforme Camargo; Sentelhas (1997)	92
Tabela 3 – Coeficiente de escoamento (C), armazenamento (S), número de curva calibrado (CN) e coeficiente de Nash e Sutcliffe de calibração para as microbacias em estudo	93
Tabela 4 – Número de curva (CN) para bacias agrícolas nas condições de umidade antecedente normal (AMC II)	98

CAPÍTULO 3

Tabela 1 – Características morfométricas das microbacias experimentais estudadas	108
Tabela 2 – Eventos selecionados de chuva/deflúvio para as estações chuvas de 2009, 2010, 2011 e 2012 na microbacia com vegetação nativa	114
Tabela 3 – Eventos selecionados de chuva/deflúvio para as estações chuvas de 2009, 2010, 2011 e 2012 na microbacia com vegetação raleada	115
Tabela 4 – Coeficiente de escoamento dos eventos selecionados de chuva/deflúvio para as estações chuvas de 2009, 2010, 2011 e 2012 para as microbacias com vegetação nativa e relada	118
Tabela 5 – CN calibrado para as microbacias considerando os cenários de razão de abstração recomendado pelo SCS e medido nesse estudo	119
Tabela 6 – Índices de validação aplicados para os cenários estudados	120

Tabela 7 – Valores médios, desvio padrão e coeficiente de variação para os parâmetros CN e λ da microbacia com vegetação nativa e raleada	121
Tabela 8 – Média e desvio padrão da precipitação, bem como, resultados precipitação efetiva dos eventos selecionados para a análise de confiabilidade.....	122

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO GERAL	15
2 OBJETIVOS	17
2.1 Geral	17
2.2 Específicos	17
3 REVISÃO DE LITERATURA	18
3.1 Hidrologia e o Ciclo Hidrológico	18
3.2 Escoamento Superficial	19
3.3 Hidrologia comparativa	21
3.3.1 Precipitação e Umidade antecedente do solo	22
3.3.2 Cobertura Vegetal	24
3.4 Modelo CN-NCRS	26
4. ÁREA DE ESTUDO	31
4.1 Localização	31
4.2 Características Fisiográficas	32
4.3 Clima	35
4.4 Solos	37
4.5 Cobertura Vegetal – Manejo	39
4.6 Monitoramento Hidrológico das Microbacias	44
4.6.1 Precipitação	44
4.6.2 Escoamento Superficial	46
4.6.3 Infiltração	49
4.6.4 Umidade do Solo	50
REFERÊNCIAS	51

CAPÍTULO 1 - ANÁLISE COMPARATIVA DO ESCOAMENTO SUPERFICIAL DE MICROBACIAS EXPERIMENTAIS EM CLIMA SEMIÁRIDO TROPICAL

59

RESUMO	59
ABSTRACT	60
1 INTRODUÇÃO	61
2 MATERIAL E MÉTODOS	62
3 RESULTADOS E DISCUSSÕES	65
4 CONCLUSÕES	78
REFERÊNCIAS	79

CAPÍTULO 2 - OTIMIZAÇÃO DO NÚMERO DE CURVA (CN-SCS) PARA DIFERENTES MANEJOS NA REGIÃO SEMIÁRIDA, CEARÁ, BRASIL

82

RESUMO	82
ABSTRACT	83
1 INTRODUÇÃO	84
2 MATERIAL E MÉTODOS	85

2.1 Área de Estudo.....	85
2.2 Monitoramento Hidrológico	88
2.3 Calibração e Validação	89
3 RESULTADOS E DISCUSSÕES	93
3.1 Calibração	93
3.2 Validação	95
4 CONCLUSÕES.....	99
5 AGRADECIMENTOS	99
REFERÊNCIAS	99

CAPÍTULO 3 - AVALIAÇÃO COMPARATIVA DO MODELO CN-NRCS PARA MICROBASIAS COM DIFERENTES MANEJOS EM REGIÃO SEMIÁRIDA..... 103

RESUMO.....	103
ABSTRACT	104
1 INTRODUÇÃO	105
2 MATERIAL E MÉTODOS	106
2.1 Área de estudo.....	106
2.2 Cálculo da abstração inicial.....	109
2.3 Calibração e validação do CN	110
2.4 Confiabilidade do modelo CN-NRCS	112
2.5 Sensibilidade dos parâmetros CN e λ	113
3 RESULTADOS E DISCUSSÕES	114
3.1 Relação da λ com base em análise de eventos de chuva-deflúvio.....	114
3.2 Calibração e validação do CN	118
3.3 Confiabilidade do modelo CN-NRCS	121
3.4 Sensibilidade dos parâmetros CN e λ	123
4 CONCLUSÕES.....	125
REFERÊNCIAS	126

1 INTRODUÇÃO GERAL

O semiárido brasileiro se caracteriza pela relação entre a precipitação pluviométrica anual e evapotranspiração potencial anual, índice de aridez compreendido entre 0,21 e 0,50, pela concentração do período chuvoso em apenas dois ou três meses e, principalmente, pelo descompasso das precipitações pluviométricas. As chuvas costumam ser irregulares, tanto no espaço quanto no tempo. Os solos do Ceará são, na grande maioria, originários de rochas cristalinas, apresentando-se impróprios para explorações intensivas, pois são rasos, pobres em matéria orgânica, com substrato impermeável e pedregoso. Sendo assim, o armazenamento de água no solo é restrito e o regime de chuvas rápidas e intensas também dificulta a infiltração de água no subsolo.

A intensificação da exploração do homem sobre os recursos naturais no semiárido brasileiro tem causado a degradação do solo, dos recursos hídricos, remoção da vegetação nativa e perda da biodiversidade, que somados aos fatores climáticos podem resultar em modificações significativas dos processos hidrológicos, notadamente no processo chuva-deflúvio.

A magnitude do processo chuva-deflúvio depende de fatores como: intensidade da precipitação pluviométrica, geologia, permeabilidade do terreno, condição de umidade antecedente do solo, duração e frequência da precipitação, tipo de cobertura vegetal, área da bacia de drenagem, distribuição espacial e temporal da precipitação pluviométrica, geometria dos rios e riachos e declive dos terrenos. Destes fatores mencionados, a cobertura vegetal é uma das variáveis de maior influência na resposta hidrológica de uma bacia hidrográfica. A eliminação da cobertura vegetal torna a superfície do solo mais exposta a ação direta das gotas das chuvas sobre o solo, bem como, ao livre movimento da água na superfície, diminuindo o tempo de oportunidade de infiltração e consequentemente produzindo uma maior geração de escoamento superficial.

É comum a prática de desmatamento das florestas do semiárido brasileiro, cujo bioma predominante é a Caatinga, em função das pressões demográficas pela demanda crescente de produtos agrícolas e florestais, como forma de garantir áreas úteis para produção agrícola e pecuária. Essas práticas da agricultura tradicional que incluem o desmatamento total, a queimada da madeira, cultivo de até dois anos e pousio (ausência de cultivo ou outro uso da terra) para recomposição parcial da vegetação nativa, vem causando, aos ecossistemas do semiárido, vultosas perdas em seus recursos naturais. No entanto, a adoção de técnicas de

manejo da vegetação que busque uma exploração sustentável, seja para produção de alimento, pastagem ou madeireira, ainda são pouco estudadas e adotadas no semiárido brasileiro.

Apesar do desenvolvimento de alguns estudos conduzidos no semiárido sobre alterações de microbacias, novas pesquisas devem ser implementadas no sentido de gerar informações em escala de microbacias rurais de escoamento efêmero, principalmente investigando a influência do homem na alteração dos processos naturais (escoamento superficial, evaporação, infiltração, temperatura, erosão e sedimentos etc.). Os desafios desses estudos têm sido principalmente devido à dificuldade de um monitoramento contínuo, de forma a gerar informações qualitativas e quantitativas consistentes do processo chuva-deflúvio e dos diversos fatores que exercem influência sobre o mesmo.

Considerando as dificuldades no monitoramento contínuo, os modelos hidrológicos vêm tornando-se essenciais ferramentas de planejamento e decisão, além das clássicas funções de avaliações hidrológicas. A estimativa do escoamento superficial é essencial para a avaliação do potencial de rendimento de água em uma bacia hidrográfica, bem como, no planejamento de medidas de conservação do solo e água, redução do assoreamento e riscos de inundações a jusante. Embora muitos modelos hidrológicos estejam disponíveis para a estimativa do escoamento gerado de uma chuva, a maioria dos modelos é limitada, seja pela sua entrada de dados intensivos ou por requerimentos de processos de calibração.

Um modelo simples e largamente utilizado em bacias hidrográficas no mundo é o método do Número de Curva (CN) desenvolvido na década de 1950 pelo Serviço de Conservação dos Solos (SCS-USDA), atualmente Serviço de Conservação dos Recursos Naturais (NRCS). Embora, o método de CN já seja bastante usado em todo o mundo, somente nas últimas décadas é que passou a ser empregado com uma maior frequência no Brasil.

O método do Número de Curva (CN) baseia-se no conceito de que a lâmina de escoamento superficial produzida em um dado evento é uma função da altura total da lâmina precipitada e das abstrações iniciais, que representam as perdas que ocorrem, principalmente, devido à infiltração, à interceptação vegetal e à retenção em depressões do terreno. Os valores de CN são obtidos para cada uso e cobertura do solo em tabela padrão do SCS. As tabelas foram desenvolvidas para as condições de uso e cobertura do solo dos EUA, em conjunto com quatro grupos de solos classificados de acordo com a taxa de infiltração, textura e estrutura. Para alguns usos da terra e grupo de solo o valor de CN não está disponível nos manuais e assim deve ser estimado. Desta forma, emerge a importância do desenvolvimento de pesquisas que sejam capazes de estimar o número da CN mediante diferentes cenários de uso

e ocupação do solo para diferentes regiões. Já que, quando se trata da cobertura vegetal das bacias hidrográficas, sabe-se que este fator sofre várias modificações tanto naturais quanto antrópicas, e essa dinâmica produz alterações nas respostas hidrológicas.

2 OBJETIVOS

2.1 Geral

O objetivo principal dessa pesquisa foi analisar e comparar as respostas hidrológicas de microbacias hidrográficas localizadas no semiárido brasileiro, gerando informações das principais variáveis hidrológicas envolvidas no processo de chuva-deflúvio, verificando a influência da ação antrópica na geração de escoamento, e avaliando o escoamento superficial sob a ótica do modelo hidrológico CN-NCRS.

2.2 Específicos

- (i) **Medir e monitorar** as principais variáveis hidrológicas envolvidas no processo de chuva-deflúvio (Total de chuva precipitada, umidade antecedente, distribuição temporal da precipitação pluviométrica caracterizada pelas diversas intensidades, infiltração abstração inicial, limites mínimo de escoamento etc);
- (ii) **Sintetizar** a hidrologia de microbacias experimentais de clima semiárido, uma com vegetação nativa e outra com vegetação raleada, para o período de 2009-2012, em termos de precipitação pluviométrica e de escoamento superficial;
- (iii) **Analisar** o efeito da ação antrópica pelo manejo da vegetação sobre as respostas hidrológicas em microbacias rurais;
- (iv) **Gerar** informações do processo de chuva-deflúvio para microbacias de escoamento efêmero, servindo de base para estudos posteriores;

- (v) **Calibrar** e **validar** o parâmetro número de curva (CN) para três microbacias com diferentes manejos da vegetação em microbacias rurais no semiárido brasileiro;
- (vi) **Determinar** a razão de abstração inicial (λ) para duas microbacias com diferentes manejos da vegetação;
- (vii) **Aplicar** ao modelo CN-CRCS uma análise de sensibilidade dos parâmetros de entrada (CN e λ) e de confiabilidade do modelo.

3 REVISÃO DE LITERATURA

3.1 Hidrologia e o Ciclo Hidrológico

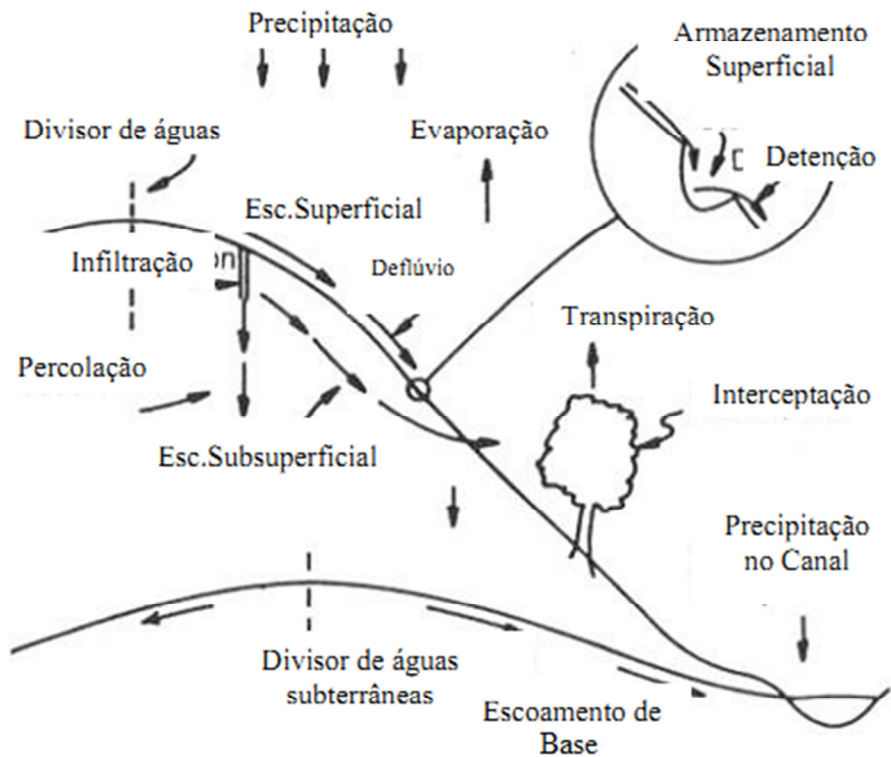
A água é um dos elementos físicos mais importantes na composição da paisagem terrestre, interferindo na fauna e flora, e interagindo com os demais elementos da natureza e seu meio. Conforme o United States Federal Council of Science and Technology, citado por Vilella e Mattos (1975), a Hidrologia é a ciência que trata da água na Terra, estudando a sua ocorrência, circulação e distribuição, as suas propriedades físicas e químicas e as suas reações com o ambiente, incluindo suas relações com a vida.

A circulação da água na Terra recebe o nome de ciclo hidrológico. Esse conceito caracteriza bem o comportamento natural da água quanto às suas ocorrências, transformações e relações com a vida humana. No ciclo hidrológico distinguem-se diversos mecanismos ou formas de transferência de água. Sendo que, todos esses processos possuem um papel central na hidrologia. Contudo, considerando-se a centralidade do processo chuva-deflúvio, os processos precipitação, infiltração, escoamento superficial, armazenamento superficial, retenção superficial e deflúvio dos rios são os mais estudados na hidrologia (HAAN et al., 1993 apud COSTA, 2007).

O ciclo hidrológico em um aspecto geral, e, se considerado de maneira global, pode ser visto como um sistema hidrológico fechado, já que a quantidade de água disponível na terra é finita e indestrutível. Dentre as regiões hidrológicas de importância prática destaca-se a bacia hidrográfica, que vem sendo reconhecido como um sistema excessivamente complexo, e que uma gota d'água pode seguir em um elevado número de caminhos entre a precipitação e a superfície (COSTA, 2007). No Brasil, a bacia hidrográfica é adotada como a unidade básica física-territorial para o planejamento e o gerenciamento dos recursos hídricos.

Na Figura 1 são apresentados os processos hidrológicos durante um evento chuvoso em uma porção de uma bacia hidrográfica (HAAN et al., 1993 apud COSTA, 2007).

Figura 1 – Diagrama hidrológico de um evento chuvoso em uma porção de uma bacia hidrográfica.



Fonte: Haan et al. (1993) adaptada por costa (2007)

3.2 Escoamento Superficial

De acordo com Villela e Mattos (1975), talvez, entre as principais fases básicas do ciclo hidrológico, a do escoamento superficial seja a mais estudada, por tratar da ocorrência e transporte de água na superfície terrestre, tendo em vista que a maioria dos estudos hidrológicos está ligada ao aproveitamento da água superficial e à proteção contra os fenômenos provocados pelo seu deslocamento.

Os mecanismos principais, relacionados ao escoamento, que podem acontecer em uma bacia hidrográfica são: escoamento superficial hortoniano, escoamento superficial por

saturação subsuperficial, precipitação direta no canal, escoamento subsuperficial e o escoamento de água subterrânea (ou fluxo de base) (CHOW et al., 1988). A importância relativa de cada processo em uma dada área está principalmente condicionada ao clima (características da precipitação), à geologia, à topografia, às características do solo, à vegetação e ao uso da terra (DUNNE e LEOPOLD, 1978).

O escoamento superficial por saturação subsuperficial é produzido quando o deflúvio subsuperficial ou a percolação da água satura o solo perto da superfície inferior de um declive ou de bancos de areia de rios ocorrendo, depois, o escoamento superficial. Quando a intensidade da chuva (i) é menor que a capacidade de infiltração do solo (f) toda a água é absorvida pelo solo e não há escoamento superficial, caso contrário o escoamento superficial (Hortoniano) ocorre a uma taxa de $(i - f)$ (COSTA, 2007). O escoamento subsuperficial é geralmente desprezado devido à velocidade de fluxo ser baixa, não podendo contribuir de forma significativa como fluxo gerado pela precipitação, exceto em circunstâncias em que o solo possui alta condutividade hidráulica (CHOW et al., 1988).

A água que atinge o lençol freático é drenada pelo escoamento de base que ocorre sob a linha do lençol freático, nas camadas mais profundas do solo. Este é o principal mecanismo responsável pela perenização de um rio; no entanto, para regiões semiáridas este padrão de escoamento pode ser verificado, na maioria das vezes, nos rios somente no período chuvoso. Para cursos efêmeros e nascentes em regiões semiáridas o escoamento de base pode ser considerado desprezível (ARAÚJO e PIEDRA, 2009; SANDSTRÖN, 1996).

Alguns estudos apontam que o escoamento Hortoniano tem se mostrado predominante em algumas regiões de clima semiárido (CANTÓN et al., 2001; MUNGABE et al., 2007). Inclusive no semiárido brasileiro, em que o principal condicionante da geração de escoamento superficial são as elevadas intensidades das precipitações, gerando escoamento do tipo Hortoniano (COSTA, 2007; SRINIVASAN et al., 2003). No entanto, a ocorrência de solos rasos sobre substrato cristalino confere uma capacidade reduzida de armazenamento subsuperficial e subterrâneo da água. Consequentemente, sequências de eventos chuvosos são capazes de saturar as camadas de solo, gerando escoamento também por saturação (MEDEIROS, 2009).

Tratando-se do processo de escoamento superficial, diversos estudos têm sido conduzidos em bacias hidrográficas no semiárido brasileiro. Um dos primeiros estudos no semiárido brasileiro foi o projeto desenvolvido na década de 80 pela SUDENE/ORSTOM que monitorou a hidrologia das bacias experimentais do Nordeste: Juatama – CE, Tauá – CE, Sumé – B, Riacho do Navio - PE, Ibipeba – BA. Outro dos primeiros estudos no semiárido

brasileiro foi a implantação do projeto FINEP/IBESA que implantou uma rede de monitoramento hidrosedimentológica no Nordeste brasileiro, em parceria com universidades federais, que são as bacias experimentais de: Aiuaba - CE; Riacho da Gameleira - PE; Riacho Jatobá - PE; Rio Cedro - BA; Rio Guaraíra - PB; São João do Cariri - PB; Serra Negra do Norte - RN (RIGHETTO, 2004; CADIER, 1994).

Cadier (1994) apresentou sínteses hidrológicas de diversas bacias do semiárido brasileiro, com avaliação de processos chuva-deflúvio em várias escalas e modelagem da lâmina escoada superficialmente (COSTA, 2007). Ele utilizou em seu estudo, resultados encontrados em 43 bacias hidrográficas representativas da região. Além disso, ele conseguiu também, incluir em seu método alguns fatores relevantes para esta estimativa do escoamento como: a cobertura vegetal, a presença de açudes à montante, zonas de depressão, entre outros.

Já há algum tempo a hidrologia no semiárido vem sendo estudada, por algumas instituições e pesquisadores, por meio da instalação e monitoramento de bacias hidrográficas experimentais. Pode-se citar a Bacia Experimental de Sumé na Paraíba, caracterizada por uma precipitação pluviométrica média de 590 mm e evapotranspiração média anual de 2.900 mm. Os estudos foram realizados em escala de bacias hidrográficas de 137, 10 e 27 km² em microbacias de até 1,0 há, como também em parcelas de 100 e 1,0 m² com chuva natural e simulada (ALBUQUERQUE, 1997; ALBUQUERQUE et al., 2001; ALBUQUERQUE et al. 2002; SRINIVASAN et al., 2003 e ALBUQUERQUE et al., 2005).

Recentemente, grupos de pesquisas no Estado do Ceará como HidroSed (<http://www.hidrosed.ufc.br>) que monitora a Bacia hidrográfica Experimental de Aiuaba – BEA, localizada no semiárido cearense, tem trazido notáveis contribuições para os estudos hidrológicos na região, entre os quais pode-se citar: Medeiros (2005); Costa (2007); Araújo e Piedra (2009); Medeiros (2009); Wiegand (2011) e Figueiredo (2011). Bem como, estudos realizados em microbacias experimentais em Iguatu, Ceará, pelo grupo de pesquisa MASSA (<http://www.massapeld.ufc.br>) em trabalhos realizados por Alves (2008); Santos (2011); Izídio (2010); Lobato (2010); Lima (2011); Palácio (2011); Santos (2012) e Rodrigues et al. (2013).

3.3 Hidrologia comparativa

A necessidade de predições hidrológicas em bacias não monitoradas tem estimulado o uso de informações obtidas de outras regiões e em algumas situações, também de outras escalas (ANDRADE, 1997). Desse modo, o comparativo hidrológico pode ser uma ferramenta útil no preenchimento de falhas, porém, quando conduzido de forma inapropriada pode induzir graves erros na transferência de informações, principalmente na parametrização de modelos hidrológicos (MUSIAKE, 2003; PEEL et al. 2004). Apesar de relevante, a prática de comparativo hidrológico tem se mostrado com falhas em algumas situações, principalmente quando conduzida em ecossistemas com características climáticas diferenciadas, em que não se considera as limitações devido às especificidades de cada ambiente (ARAÚJO e PIEDRA, 2009).

Portanto, a tarefa do comparativo hidrológico consiste em identificar ambientes com atributos similares e consequente comparação dos processos e respostas hidrológicas (WOO e LIU, 2006), identificando as especificidades típicas das escalas e de caráter regional. A fim de ilustrar a heterogeneidade entre bacias, Mugabe et al. (2007) ao compararem as respostas hidrológicas de duas microbacias hidrográficas em clima semiárido no Sul da África, observaram que apesar da similaridade climática entre ambas, as respostas hidrológicas são bastante variáveis, dependendo principalmente das características de distribuição pluviométrica. Já Araújo e Piedra (2009), observaram para duas bacias tropicais que, apesar da similaridade de algumas variáveis como área, relevo, evaporação e temperatura, as variáveis hidrológicas diferiram consideravelmente.

Quando se trata de comparativo hidrológico do escoamento superficial entre bacias hidrográficas, este sofre influência de diversos fatores que facilitam ou prejudicam a sua ocorrência. Os fatores determinantes do escoamento superficial podem ser agrupados em fatores estáticos (características geomorfológicas) e dinâmicos: precipitação (duração, intensidade, deslocamento da precipitação na bacia hidrográfica etc), umidade antecedente do solo, cobertura do solo ou uso da terra.

3.3.1 Precipitação e Umidade antecedente do solo

Dentre os fatores de natureza dinâmica, destacam-se de caráter climático a intensidade e a duração da chuva e a umidade antecedente, ou seja, a condição de saturação da

bacia, pois uma precipitação pluviométrica que ocorre quando o solo está úmido devido a uma chuva anterior, terá maior facilidade de escoamento. Estudos realizados por Castillo et al. (2003), avaliando o papel da umidade antecedente na resposta do escoamento de bacias hidrográficas com o uso de simulações, verificaram que a resposta hidrológica após eventos com alta intensidade independe do teor inicial de água no solo. Por outro lado, a umidade antecedente do solo é um fator importante que controla o escoamento durante os eventos de intensidade média e baixa.

Recentemente, Ran et al. (2012) realizaram um experimento para estudar o impacto de características da chuva na geração do escoamento. Algumas das características estudadas por esses autores foram: diferentes intensidades, durações de chuva, direções e posições da chuva e, a ocorrência ou não de intervalos de precipitações. Os resultados indicaram diferenças consideráveis nas formas dos hidrogramas, no teor de água no solo, bem como, a profundidade de infiltração e o total escoado. Em geral, quando as chuvas apresentam um movimento de jusante-montante, pode ser caracterizado por hidrogramas com um aumento mais tarde e maior pico de escoamento quando comparados com chuvas que apresentam um movimento de montante-jusante. Os autores também observaram que as chuvas antecedentes, ou seja, os intervalos entre as precipitações é um fator importante na ocorrência de fenda do solo e conseqüentemente na geração do escoamento.

No sudeste do EUA Torres et al. (2011) avaliaram a relação sazonal do escoamento com a precipitação. Esses autores verificaram que a relação entre o escoamento e o total precipitado é menor durante a estação seca (verão e outono) e maior durante o período chuvoso (inverno e primavera). Observaram ainda, uma grande variabilidade sazonal no coeficiente de escoamento devido às diferenças sazonais na evapotranspiração que afeta as condições de umidade do solo. Sugerindo que, a resposta do escoamento não é apenas influenciada pela quantidade de chuva, mas também por outros fatores tais como a sua intensidade e duração, as condições de umidade do solo criadas pela evapotranspiração e os saldos acumulados de precipitação pluviométrica, que são maiores na estação chuvosa que seca.

Em se tratando de investigações em regiões semiáridas, Ceballos e Schnabel (1998) investigaram o comportamento hidrológico de uma microbacia no semiárido da Espanha. Estes autores verificaram uma análise das relações entre a precipitação, a umidade do solo e o escoamento superficial. Os resultados demonstraram uma resposta hidrológica complexa, devido ao papel dos diversos fatores que influenciam no escoamento: características da precipitação, umidade do solo etc. No entanto, verificaram que o

escoamento depende muito das condições de umidade antecedente, e não pode ser explicado apenas pelas precipitações totais, mas também depende da sua distribuição temporal.

Estudo realizado no semiárido brasileiro, como o de Figueiredo (2011) que avaliou as condições de início do escoamento superficial em uma bacia experimental, mostra que as respostas hidrológicas em bacias hidrográficas são realmente complexas. Este autor verificou que, com base apenas na pluviosidade total, não é possível avaliar se ocorrerá ou não escoamento, como em estudos realizados por Ceballos e Schnabel (1998), Cantón et al. (2001), Alencar et al. (2006) e Onda et al. (2007). A umidade antecedente do solo, apesar de sua importância na geração do escoamento, não consegue também explicar bem o início do escoamento. Para os casos estudados o autor observou que: 47% dos eventos com escoamento ocorreram quando a umidade encontrava-se na faixa alta, 34% na faixa média e somente 19% na faixa baixa. Quanto a distribuição temporal da precipitação pluviométrica, a intensidade I_{60} , foi aquela que separou mais eficientemente os eventos com e sem escoamento (51%), sendo que este valor aproxima-se do tempo de concentração da bacia, que é de aproximadamente 65 minutos. O autor concluiu que para ter início o escoamento superficial é necessário um evento pluviométrico superior a 47,50 mm, independente de sua intensidade. Isto explicou 75% da lâmina escoada para o período observado. Entretanto, não foi possível separar todos os eventos com e sem escoamento, havendo uma região em que ocorrem os dois tipos de eventos. Nesta região encontraram-se 25% do escoamento ocorrido no período estudado.

3.3.2 Cobertura Vegetal

Quando se trata da cobertura vegetal das bacias hidrográficas, sabe-se que este fator sofre várias modificações tanto naturais como antrópicas, 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 de uma bacia é modificada (GARFUR et al., 2003; GARCIA-RUIZ et al., 2008; WEI et al., 2007; GERMER et al., 2009). Autores como Rodrigues et al. (2013) verificaram a influência da vegetação nas respostas hidrológicas de microbacias monitoradas no semiárido

brasileiro, sendo os efeitos maiores sobre os primeiros eventos hidrológicos da estação chuvosa, destacando também a influência da umidade antecedente.

Cantón et al. (2001) mostraram, em estudo em regiões semiáridas do 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.

Gomes et al. (2012) mostraram a influência da cobertura vegetal na umidade antecedente do solo. Estes autores estudaram a variação da umidade entre duas microbacias com manejos distintos, localizadas no município de Iguatu, e verificaram a influência do manejo de raleamento da mata nativa (raleada) em comparação com outra, com manejo de conservação da mata nativa (natural). Sendo que, o manejo do raleamento mostrou maior conservação da umidade antecedente do solo, em mais de 89% dos eventos estudados, em comparação com o manejo natural.

Em outras regiões semiáridas como na China, Kang et al. (2001) pesquisaram em escala de lotes e microbacias chinesas 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 escoamento foi significativamente reduzido em áreas com cobertura vegetal, em comparação com ambientes de solo exposto, sendo o coeficiente de escoamento variando de 1,4 a 62,3%.

Já 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%.

Ainda quanto a influência da vegetação nas repostas hidrológicas, Balbinot et al. (2008) em uma revisão sobre o papel da floresta no ciclo hidrológico em bacias hidrográficas, verificaram que a presença ou não da vegetação e que o tipo de vegetação têm grande influência sobre a quantidade de água produzida em uma bacia hidrográfica. Relataram que para analisar os efeitos desta vegetação deve-se estudar sua influência nos vários

compartimentos do processo, por exemplo, interceptação, precipitação interna, escoamento pelo tronco e fluxos de água no solo. Autores como Wainwright et al. (2000) e Casermeiro et al. (2004) afirmam que, em áreas cobertas com vegetação, a resposta hidrológica em geral tem sido uma redução significativa de taxas de escoamento superficial. No entanto, esses autores afirmam que há diferenças nessas reduções de taxa de escoamento superficial, e essa diferença está relacionada não somente com o total de cobertura vegetal, mas também com o resultado das diferenças na fisionomia das plantas e da estrutura, que provoca diferentes valores de interceptação da precipitação pluviométrica.

No semiárido da Espanha, Mayor et al. (2011) e Cantón et al. (2011) em estudos sobre geração e variação de escoamento, alertaram sobre a importância da relação dos diferentes componentes do solo (e.g., fragmentos de rochas, a cobertura, rugosidade da superfície, profundidade do solo e o teor de matéria orgânica) e suas interações no entendimento do comportamento hidrológico, principalmente de áreas abertas que ainda não está claro (MAYOR et al., 2011). Outro fator relatado pelos autores foi a relação entre o escoamento e a dependência de escala, que comumente, trabalhos empíricos sobre questões de escala, têm confundido com outros fatores influenciadores no escoamento (principalmente cobertura vegetal). Cantón et al. (2011) ainda reforçam que séries históricas longas e confiáveis de escoamento ainda são escassas nas regiões semiáridas.

A relevância dos componentes da superfície do solo e seus padrões de distribuição para os processos hidrológicos e, especialmente, a distribuição espacial da vegetação, têm incentivado uma série de esforços no mapeamento e parametrização das características morfológicas (IMESON e PRINSEN; 2004; BOER e PUIGDEFABREGAS, 2005).

3.4 Modelo CN-NCRS

Os modelos hidrológicos se tornaram ferramentas de planejamento e decisão, além das clássicas funções de avaliações hidrológicas e, portanto, devem ser estruturados de forma simples para permitir sua utilização por diversos usuários (SINGH, 2002). Dentre esses modelos hidrológicos, destaca-se o método de Curva Número utilizado em modelos hidrológicos de bacias hidrográficas em todo mundo, desenvolvido na década de 1960 pelo

Serviço de Conservação dos Solos (SCS-USDA), atualmente Serviço de Conservação dos Recursos Naturais (NRCS);

O método de Curva Número CN-NRCS se destaca por ser simples, empírico, com pressupostos claramente definidos e, cujos dados de entrada requeridos são geralmente disponíveis, relacionando o escoamento superficial com o tipo, o manejo e a cobertura do solo e a pluviometria. Desde seu desenvolvimento, tem sido revisado e modificado por vários autores, esse modelo tem sido amplamente utilizado na estimativa de escoamento em bacias hidrográficas, bem como em outras aplicações que incluem a produção de sedimentos e modelagem de umidade do solo (PONCE e HAWKINS, 1996; HAWKINS et al., 2002; MELLO et al., 2003; MISHRA e SINGH, 2004; MISHRA et al., 2006; BALTAS et al., 2007; LIU e LI, 2008; TYAGI et al., 2008; WANG e HUANG, 2008; SHI et al., 2009; SAHU et al., 2010; BO et al., 2011).

Embora o método de Curva Número CN-NRCS tenha sido desenvolvido na década de 60 e amplamente utilizado em todo o mundo, não tem sido ainda utilizado no Brasil com tanta frequência (ANDRADE et al., 2012). Apenas na última década tem sido o seu uso disseminado no Brasil (MELLO et al., 2003; LIMA et al., 2007; ALVES et al., 2011; ANDRADE et al., 2012; ARAÚJO NETO et al., 2012).

O método do CN-NRCS baseia-se no conceito de que a lâmina de escoamento superficial produzida em um dado evento é uma função da altura total da lâmina precipitada e de um parâmetro, denominado Curva Número (CN), que representa as perdas que ocorrem, principalmente, devido à infiltração, à interceptação vegetal e à retenção em depressões do terreno (CHOW et al., 1988).

O valor de Curva Número é adimensional e pode variar de 1 a 100. Está diretamente associado com a impermeabilidade do solo, sendo que quanto mais impermeável for a área, maior será o CN e menor será a retenção da chuva (S). Os valores de CN são obtidos para cada tipo de uso e cobertura do solo em uma tabela padrão do CN-NRCS que leva em conta o tipo e a densidade de cobertura sobre a área, em conjunto com quatro grupos de solos classificados de acordo com a taxa de infiltração. Uma tabela simples com os principais manejos do solo pode ser verificada na Tabela 1, uma tabela mais completa e com os valores de CN para diferentes manejos do solo pode ser verificado em Rawls et al. (1993)

Tabela 1 – Valores médios do número de curva (CN) para bacias rurais

Uso da terra	Superfície	Tipo de Solo			
		A	B	C	D

Solo Lavrado	Com sulcos retilíneos	77	86	91	94
	Em fileiras	70	80	87	90
Plantações Regulares	Em curvas de nível	67	77	83	87
	Terraceamento em nível	64	76	84	88
	Em fileiras retas	64	76	84	88
Pastagens	Pobres, em curvas de nível	47	67	81	99
	Normais, em curvas de nível	25	59	75	83
	Boas, em curvas de nível	6	35	70	79
Campos Permanentes	Normais	30	58	71	78
	Esparsas, de baixa transpiração	45	66	77	83
	Normais	36	60	73	79
	Densos, de alta transpiração	25	55	70	77
Florestas	Muito esparsas, de baixa transpiração	56	75	86	91
	Esparsas	46	68	78	84
	Densas, de alta transpiração	26	52	62	69
	Normais	36	60	70	76

Fonte: (TUCCI, 2009)

Os grupos de solo são divididos em A, B, C e D, sendo o grupo A o mais permeável, com baixo potencial de escoamento e o grupo D o mais impermeável, com alto potencial de escoamento. O método CN-NRSC ainda leva em consideração a umidade antecedente baseada na precipitação pluviométrica total ocorrida nos últimos cinco dias ao evento em que houve escoamento. Portanto, obtém-se um valor do número da curva, CN I; CN II e CN III para condição de solo seco, normal e úmido, no qual os outros parâmetros são reajustados de acordo com o CN utilizado.

Para alguns usos da terra e grupo de solo o valor CN não está disponível nos manuais e assim deve ser estimado. Desta forma, emerge a importância do desenvolvimento de pesquisas que sejam capazes de estimar o número da CN mediante diferentes cenários de uso e ocupação do solo para diferentes regiões. Alguns trabalhos têm buscado determinar o valor CN para algumas bacias hidrográficas localizadas no semiárido nordestino como Figueiredo (2011), Almeida (2011), Andrade et al. (2012) e Araújo Neto et al. (2012). Em outras regiões como na China, alguns pesquisadores também determinaram novos valores de CN para cada tipo de uso da terra, porque eles acreditavam que os valores de CN dos EUA não poderiam ser exportados para outros países (ZHANG et al., 2003; JIN et al., 2003; ZHANG et al., 2004; GAO et al., 2006; WANG e HUANG, 2008).

Ponce e Hawkins (1996) apontaram em seu trabalho uma relação das vantagens e desvantagens do método CN-NRSC.

Entre as vantagens se destacam:

- Método simples, apoiado por dados empíricos, para estimação do escoamento direto baseado na precipitação pluviométrica total;
- Depende somente de um parâmetro, o número da curva CN, que varia em função de quatro propriedades da bacia: grupo hidrológico de solo, uso e cobertura do solo, condições da superfície hidrológica e condições de umidade antecedente;
- A metodologia esta caracterizada com a realidade controlada e relacionada com entradas do ambiente bem documentada e;
- O método está bem estabelecido sendo usado e aceito nos Estados Unidos e outros países, o que possibilita a aplicação do modelo e a comparação entre bacias hidrográficas não monitoradas de outras regiões.

Como desvantagens os autores apresentaram:

- O método foi originalmente desenvolvido usando dados regionais do meio oeste dos Estados Unidos, por isso recomendado com precaução para outras regiões geográficas e climáticas;
- Em alguns casos, particularmente para valores de CN baixo e/ou com pequena precipitação, o método pode ser muito sensível para determinação do CN e das condições antecedentes de umidade do solo;
- Por o método ter sido desenvolvido para áreas agrícolas, e posteriormente aplicado para áreas urbanas ele negligencia o escoamento de base, e, portanto, tem melhor aplicabilidade para bacias hidrográficas de primeira e segunda ordem em regiões subúmidas e úmidas e para rios efêmeros em regiões áridas e semiáridas;
- O método não contabiliza o efeito de escala espacial na determinação do escoamento superficial e;
- O método fixa a taxa de abstração inicial (λ) em 0,2.

O método de Curva Número CN-NRCS tem como base a lei da conservação da massa, aqui exposta sob a forma do balanço hídrico de um evento de precipitação:

$$P = Ia + F + Pe \longrightarrow \frac{Pe}{P - Ia} = \frac{F}{S} \quad (1)$$

$$Ia = \lambda S \quad (2)$$

Onde: P é a precipitação (mm), I_a é abstração inicial (mm), F é a infiltração acumulada excluindo a I_a (mm), P_e é o escoamento direto ou precipitação efetiva (mm), S é o potencial máximo de armazenamento após o início do escoamento (mm) e λ é a razão de abstração inicial pelo armazenamento.

Combinando estas hipóteses fundamentais (Equações 1 e 2) obtém-se a Equação 3 para o cálculo da precipitação efetiva:

$$P_e = \frac{(P - I_a)^2}{P + S - I_a} \quad (3)$$

Esta equação é válida para $P > I_a$, caso contrário, $P_e = 0$. O parâmetro S na Equação 4 é definido como:

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (4)$$

Onde: o parâmetro S é dado em mm; e o CN é o número de curva, parâmetro que considera a impermeabilidade do solo, o tipo e a cobertura do solo e varia de acordo com três condições de umidade antecedente.

Do total precipitado, a abstração inicial corresponde à parcela desta que ocorreu anteriormente à precipitação pluviométrica efetiva, ou seja, aquela precipitação que efetivamente escoará superficialmente. Admite-se que a parcela abstraída ou infiltra no solo ou fica retida pela vegetação e obstáculos no terreno (CHOW et al., 1988).

Uma das hipóteses simplificadora do modelo é a utilização tradicional do valor da constante λ como 0,2. No entanto, essa relação de abstração inicial é um pressuposto que pode exigir um refinamento mais detalhado (SHI et al., 2009). Alguns autores atestaram que valores menores para esta constante simulam melhor o escoamento superficial (HAWKINS et al., 2002; MELLO et al., 2003; MISHRA e SINGH, 2004; BALTAS et al., 2007; SHI et al., 2009). Ponce e Hawkins (1996) ainda sugerem que a fixação da relação de abstração inicial pelo armazenamento em 0,2 deve ser interpretado como um parâmetro característico de cada bacia, assim como o parâmetro número da curva ou “cuer number” (CN).

O conhecimento da sensibilidade em relação aos parâmetros de entrada é de fundamental importância na avaliação de um modelo. A análise de sensibilidade é uma avaliação das magnitudes relativas nas respostas do modelo em função de mudanças relativas nos valores dos parâmetros de entrada do mesmo (NEARING et al., 1990). Para o modelo CN-NRCS, esta análise permite a avaliação do efeito da variação dos parâmetros (λ e CN) nos valores estimados do escoamento superficial (BO et al., 2011).

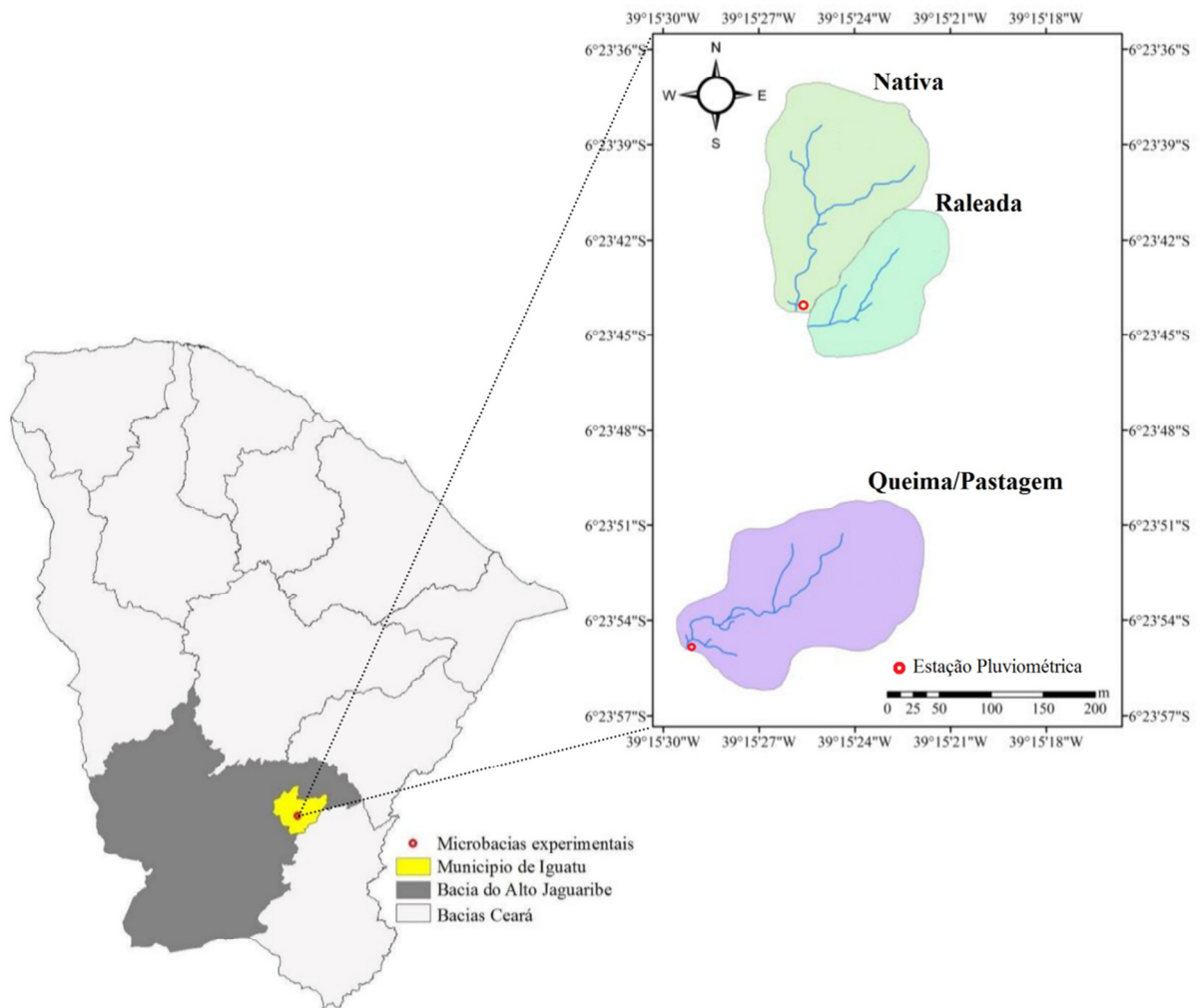
Outra análise relevante na aplicação de um modelo é a confiabilidade da saída, que permite avaliar o nível de confiança das previsões de um modelo. A análise de confiança é uma ferramenta que permite, a partir do conhecimento da variabilidade existente nos valores dos parâmetros e das incertezas das variáveis de um modelo hidrológico por meio de suas distribuições de probabilidades, determinar o ajuste do modelo aos dados hidrológicos. De acordo com Chow et al. (1988), a confiabilidade dos resultados da análise de frequência depende de quão bem o modelo probabilístico assumido, se aplica ao conjunto de dados hidrológicos estudados. Buratto (2005) afirma que a confiabilidade sintetiza a chance, em termos percentuais, de que uma determinada variável de interesse fique dentro de um determinado intervalo especificado, indicando o percentual de cenários gerados pela simulação que está dentro desse intervalo. Uma das técnicas utilizadas para a análise de confiabilidade é o método de Monte Carlo. O nome desse método de simulação vem do Cassino de Monte Carlo que fica no principado de Mônaco. A simulação de Monte Carlo é um experimento amostral cujo objetivo é estimar a distribuição de resultados possíveis da variável aleatória, com base em uma ou mais variáveis de entrada que se comportam de forma probabilística e de acordo com alguma distribuição estipulada (EVANS; OLSON, 1998).

4. ÁREA DE ESTUDO

4.1 Localização

A área de estudo é composta por três microbacias experimentais, localizadas no município de Iguatu, Ceará, Brasil. Fazem parte da grande bacia hidrográfica do rio Jaguaribe, mais precisamente na sub-bacia do Alto Jaguaribe, entre as coordenadas 6°23'42'' S e 6°23'47'' S e, 39°15'24'' W e 39°15'29'' W (Figura 2). Pertencem ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará – IFCE.

Figura 2 - Localização das microbacias experimentais no município de Iguatu, Ceará



4.2 Características Fisiográficas

As microbacias são formadas por cursos d'água classificados, segundo Sthalher, como de 1ª e 2ª ordem, sendo desta forma, áreas de nascentes. 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.

Os estudos na área iniciaram-se em 2007 onde as microbacias foram devidamente delimitadas e caracterizadas por Alves (2008) e Rodrigues (2009), e serviram de suporte para o presente trabalho. O levantamento planialtimétrico foi conduzido empregando-se um Taqueômetro ou Estação Total, 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, em datum WGS84 sistema de coordenadas em projeção UTM (*Universal Transversa de Mercator*), e os demais foram levantados e corrigidos a partir deste. O pós-processamento foi conduzido através do software tope AVN, cujo arquivo foi convertido para formato ASCII e processado através do software ArcMap 9.3, em que se confeccionou o Modelo Numérico do Terreno (MNT) das microbacias (Figura 3). Os mapas de classes de declividade foram separados em seis intervalos distintos, sugeridos pela Embrapa (1979), conforme mostrado nos mapas da Figura 4 (SANTOS, 2012).

Figura 3 – Representação do Modelo Numérico do Terreno (MNT) das microbacias: (a) microbacia com caatinga nativa; (b) microbacia com caatinga raleada e (c) microbacia com queima e plantação de pastagem

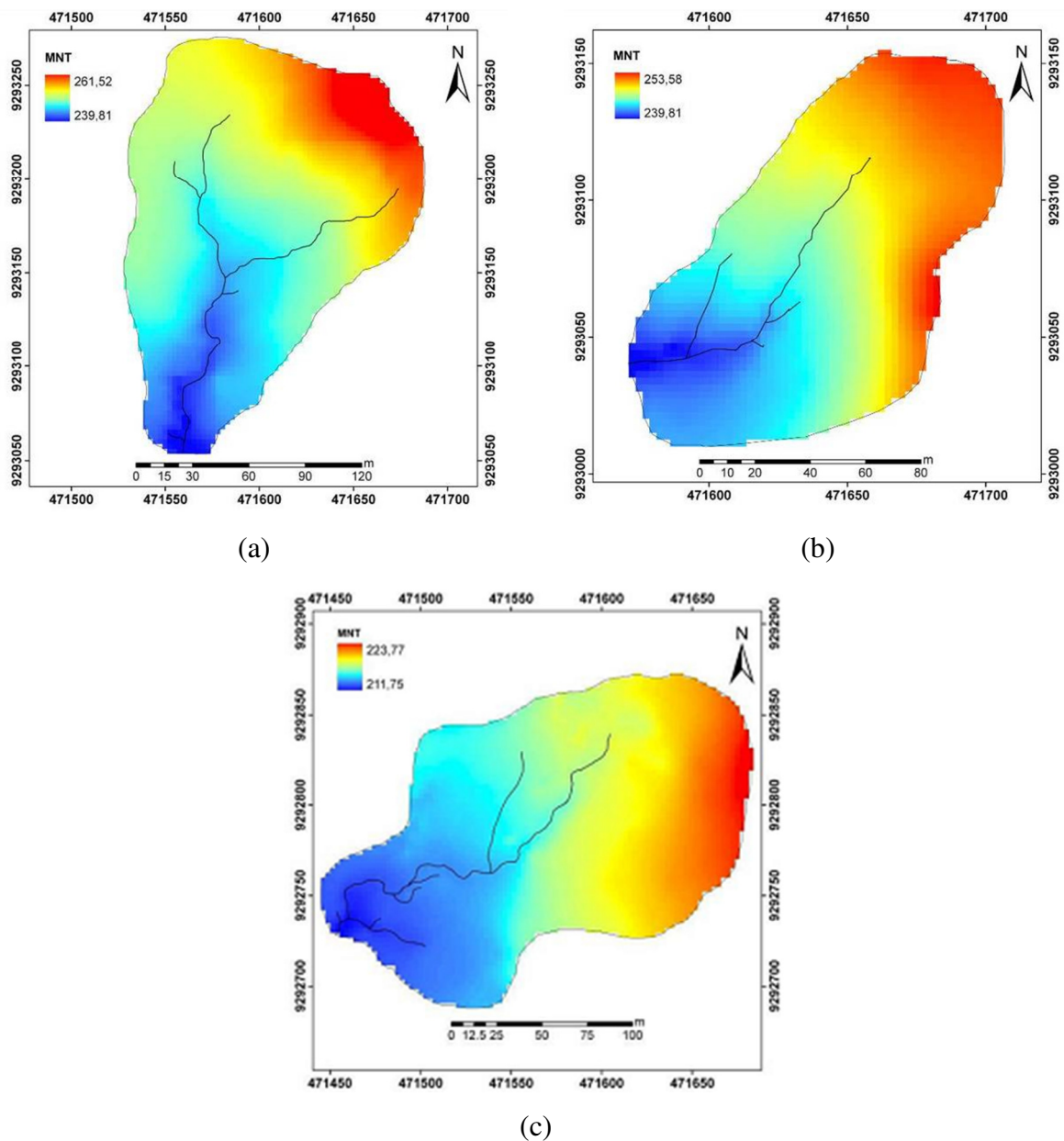
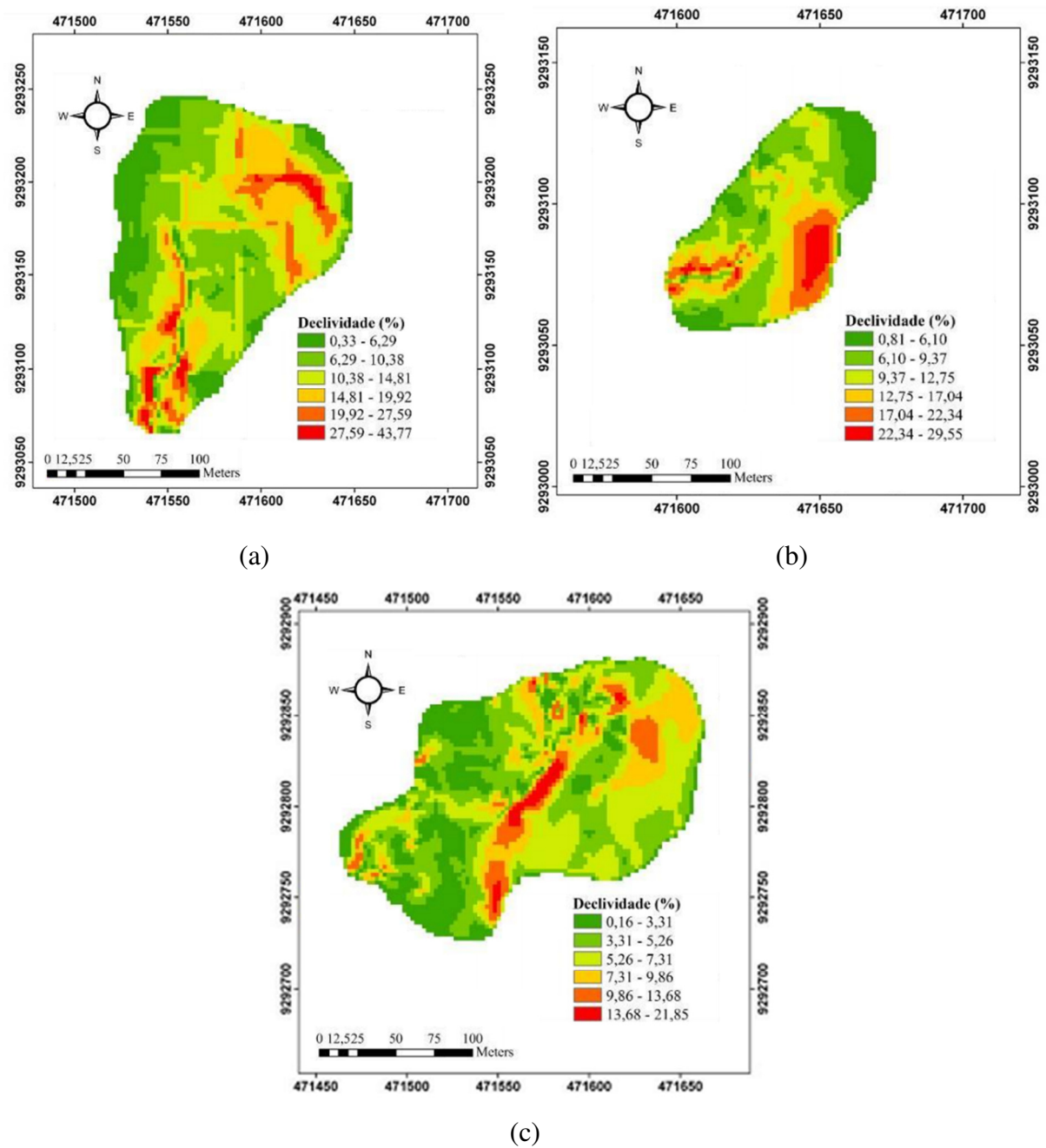


Figura 4 – Distribuição das classes de declividade das microbacias: (a) microbacia com caatinga nativa; (b) microbacia com caatinga raleada e (c) microbacia com queima e plantação de pastagem



Na Tabela 2 estão explicitadas as características morfométricas das microbacias experimentais calculadas de acordo com Villela e Matos (1975).

Tabela 2 – Características morfométricas das microbacias experimentais: caatinga nativa, caatinga raleada e queima com pastagem

Características	Valores			Unidades
	Microbacias			
	Nativa	Raleada	Queima/Pastagem	
Área da bacia (Ab)	11.491,9	20.637,6	28.013,7	m ²
Perímetro (P)	478,4	594,5	696,8	m
Comprimento do talveque (Lt)	120,5	183,9	187,9	m
Comprimento do curso princ. (Lcp)	147,2	252,1	238,2	m
Comprimento da bacia (Lb)	188,2	204,4	253,9	m
Declividade da bacia (Db)	8,7	10,6	5,6	%
Fator de forma (Rf)	0,3	0,5	0,4	-
Coefficiente de compacidade (Kc)	1,3	1,2	1,2	-
Tempo de concentração (Tc)	0,1	0,1	0,1	h
Extensão média do escoamento superficial	19,5	20,5	29,4	m
Sinuosidade do curso principal (Sin)	1,2	1,4	1,3	-

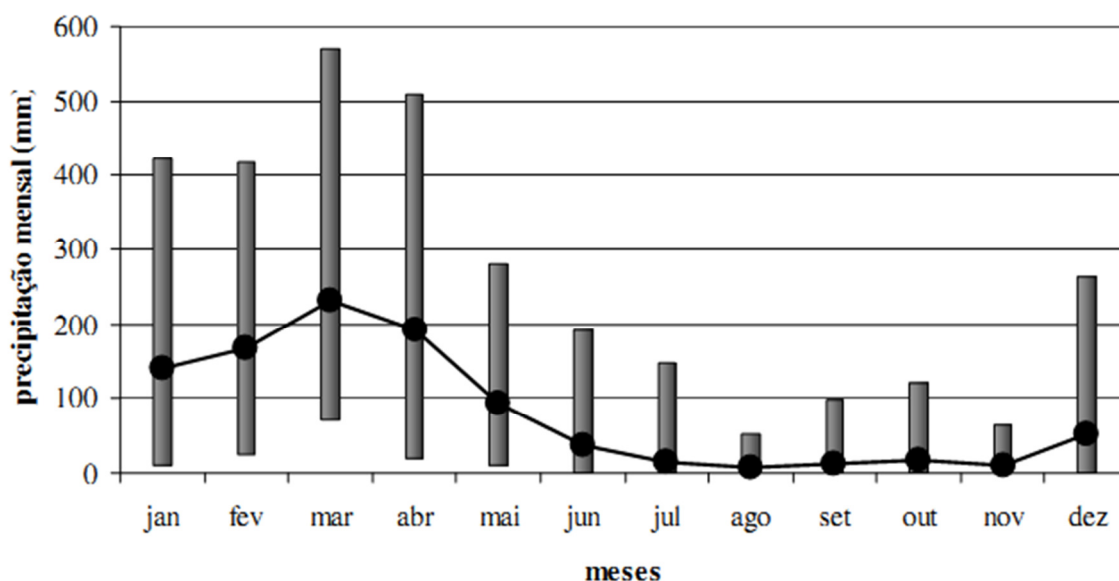
Fonte: Alves (2008)

4.3 Clima

As microbacias monitoradas estão inseridas no Sertão do Ceará, em uma região onde o clima é do tipo BSw'h' (quente e semiárido), de acordo com a classificação climática de Köppen, com temperatura média sempre superior a 18 °C no mês mais frio. A precipitação pluviométrica média histórica no município de Iguatu, entre os anos de 1974/2008, demonstrou valor médio de 970 ± 316 (RODRIGUES, 2009).

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 5.

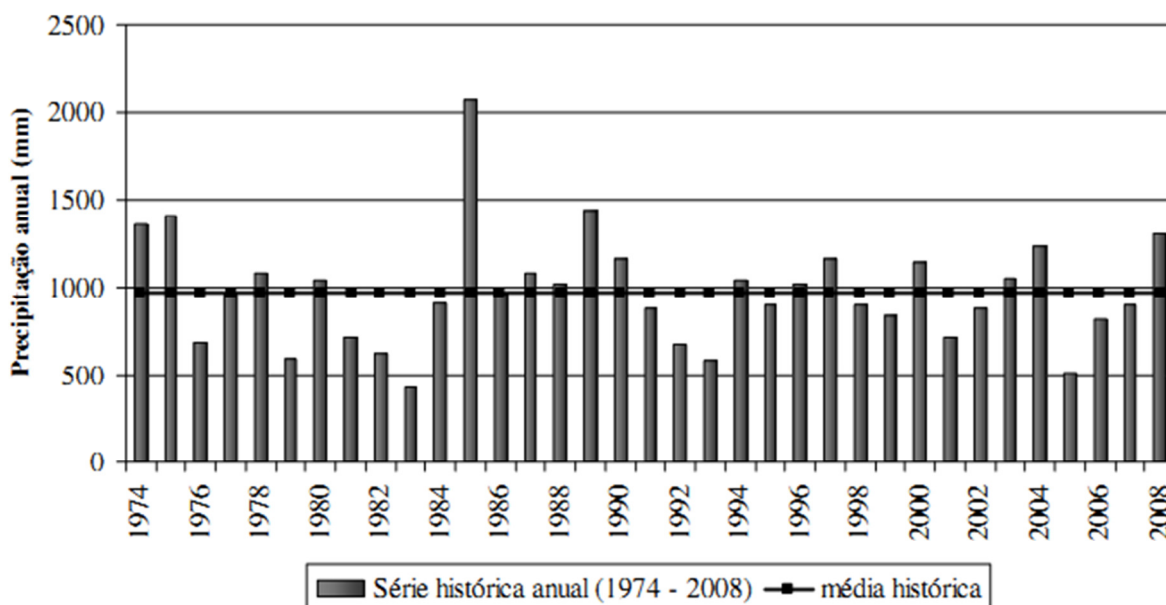
Figura 5 – Série histórica mensal de precipitação pluviométrica no posto de Iguatu, Ceará, com as barras verticais representando a amplitude mensal para a série histórica entre 1974 e 2008



Fonte: Rodrigues (2009)

A região de Iguatu mostrou, de acordo com a série histórica (1974 e 2008), uma alta variabilidade temporal entre o total precipitado anual (Figura 6), apresentando 17 anos abaixo da média histórica e uma distribuição média anual com apenas 57 dias com chuva e desvio padrão de 16 dias.

Figura 6 – Série histórica anual de precipitação pluviométrica no posto Iguatu no município de Iguatu, Ceará



Fonte: Rodrigues (2009)

A região é caracterizada também por altas taxas evaporativas, com medida em tanque classe “A” chegando a $2.943 \text{ mm ano}^{-1}$ 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. Demais características climáticas da região podem ser visualizadas na Tabela 3.

Tabela 3 – Características climáticas para o município de Iguatu, Ceará

Variável	Valor	Unidade
Precipitação pluviométrica	800,4	mm ano^{-1}
Temperatura máx. média	31,7	$^{\circ}\text{C}$
Temperatura mín. média	20,3	$^{\circ}\text{C}$
Radiação solar média anual	5,63	$\text{kWh m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$
Insolação	2897,6	h ano^{-1}
Umidade relativa do ar	61,8	%
Velocidade do vento	2,1	m s^{-1}

Fonte: Santos (2012) adaptada

4.4 Solos

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.

Devido ao tipo de argila presente nos solos das microbacias é comum o 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.

Para a classificação dos solos, foi aberta uma trincheira entre as microbacias com Caatinga nativa e raleada, por serem áreas pequenas e adjacentes, e outra na microbacia com o manejo da queima e posterior plantação de pastagem. As trincheiras tinham dois metros de profundidade. Os solos das duas áreas foram classificados como Vertissolos Ebânico Carbonático Típico. Já para a caracterização físico-química do solo foram coletadas amostras deformadas em vários horizontes de cada trincheira e levadas para os Laboratórios de Física e Química do Departamento de Solos da Universidade Federal do Ceará. Os parâmetros físico-químicos dos solos das microbacias podem ser observados na Tabela 4.

Tabela 4 – Dados de análise físico-química do solo das microbacias

Microbacia	Nativa e Raleada			Queima/Pastagem			
Horizontes	A	B	BCv	A	B1	B2	C1
Profundidades (cm)	0 a 5	5 a 21	21 a 31	0 a 25	25 a 103	103 a 116	116 a 137
Parâmetros físicos							
Areia (g kg ⁻¹)	137	205	182	315	291	166	322
Silte (g kg ⁻¹)	447	405	470	425	387	502	478
Argila (g kg ⁻¹)	416	390	348	260	322	332	200
Silte/Argila	1	1	1	2	1	2	2
Parâmetros químicos							
C (g kg ⁻¹)	24,1	13,3	10,2	8,31	5,75	5,44	3,86
pH	7,6	8,2	8,2	8,5	6,8	9,2	9,3
Ca (cmol _c kg ⁻¹)	35	43	39	18	20	18	20,8
Mg (cmol _c kg ⁻¹)	12	10	8,6	15,2	12,4	10	14,2
K (cmol _c kg ⁻¹)	1,04	0,37	0,29	0,21	0,19	0,23	0,21
Na (cmol _c kg ⁻¹)	0,13	0,13	0,15	0,81	1,42	3,37	5,32
H + Al (cmol _c kg ⁻¹)	1,7	1,2	1,2	2,6	2	1	1
CaCO ₃ (g kg ⁻¹)	145	144	151	146	130	157	213
P assim (mg kg ⁻¹)	42	62	59	8	9	9	10
CE (dS m ⁻¹)	0,48	0,3	0,29	0,3	0,3	0,4	1

As Figuras 7a e 7b evidenciam a situação das microbacias nas duas estações do ano (seca e chuvosa). As características de baixa umidade do solo no início da estação chuvosa, bem como, após períodos de veranicos, influenciam significativamente os precoces de infiltração e geração de escoamento nas microbacias.

Figura 7 – (a) Detalhe da estrutura do solo no período seco; (b) Condição de encharcamento dos solos no período chuvoso



(a)



(b)

4.5 Cobertura Vegetal – Manejo

Segundo Alves (2008) a área apresenta uma vegetação relativamente conservada, sendo enquadrada como caatinga arbustivo-arbórea fechada, mas apesar de apresentar uma boa cobertura vegetal na maior parte da área de estudo, em algumas partes são observadas áreas com ausência de vegetação ou com vegetação de menor porte (Figura 8). Isso possivelmente se deve à ação antrópica em anos anteriores (PALÁCIO, 2011).

Figura 8 – Áreas das microbacias com ausência de vegetação

Quando ao manejo aplicado na Tabela 5 observam-se em síntese as características da cobertura vegetal das microbacias durante o período estudado.

Tabela 5 – Características da cobertura vegetal das microbacias ao longo do período estudado

Microbacia	Cobertura Vegetal			
	2009	2010	2011	2012
Vegetação Nativa	Nativa	Nativa	Nativa	Nativa
Vegetação Raleada	Raleada	Raleada	Raleada	Raleada
Queima/Pastagem	Nativa	Desmatada/Queima/Pastagem	Pastagem	Pastagem

A vegetação da microbacia com caatinga nativa foi mantida inalterada e apresenta uma caatinga fechada, cobrindo totalmente o solo no período chuvoso; com isso, permite pouco desenvolvimento do estrato herbáceo. Cabe salientar que a vegetação caatinga perde suas folhas (Figura 9) durante o longo período de estiagem da estação seca. Este fato faz com que no início da estação chuvosa, ocorra uma alteração das respostas hidrológicas.

Figura 9 – Aspectos da vegetação (a) no período chuvoso e (b) no período seco



(a)



(b)

A microbacia com caatinga raleada foi propositadamente alterada durante os anos de monitoramento (Figura 10, 11 e 12), prática ainda pouco empregada por pequenos agricultores do semiárido brasileiro. Em decorrência do tratamento, grande parte dessa microbacia apresenta maior desenvolvimento de espécies herbáceas de caráter forrageiro recobrando a superfície do solo, que promove uma maior oportunidade de infiltração da radiação solar e consequentemente, desenvolvimento da vegetação rasteira.

Figura 10 – Visão parcial da condição da vegetação na microbacia com caatinga raleada (a) após o raleamento na estação seca e (b) na estação chuvosa subsequente ao raleamento



(a)



(b)

Figura 11 – Vegetação na microbacia raleada na estação chuvosa: (a) antes do tratamento e (b) depois do tratamento

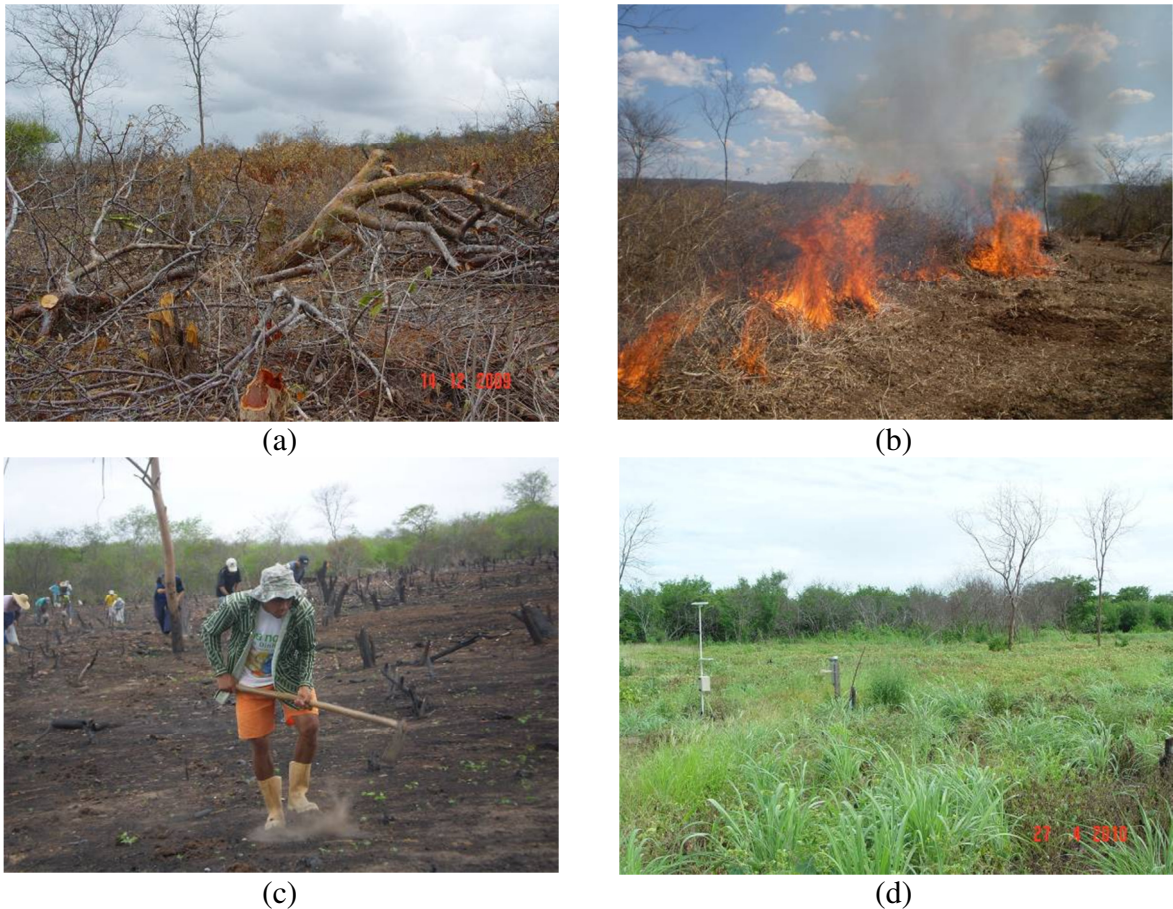


Figura 12 – Vegetação na microbacia raleada na estação seca: (a) antes do tratamento e (b) depois do tratamento



À terceira microbacia foi aplicado o manejo da queimada, sendo a mesma plantada com gramínea andropogon (*Andropogon gayanus* Kunt), que é adaptada à região semiárida, para a produção de pastagem, prática que se tornou rotineira na região, após o declínio da cultura do algodão, que dominou a região de Iguatu nas décadas de 1970 e 1980. O desmatamento ocorreu na estação seca de 2009 e o capim foi plantado antes das primeiras chuvas do ano de 2010. Quando ocorreram as primeiras chuvas, como esperado, as ervas daninhas cresceram e começaram a cobrir o capim. Então, foi aplicado herbicida seletivo para dicotiledônea, para que o capim conseguisse se desenvolver de forma melhor. Nas Figuras 13a, b, c e d podem ser visualizadas as fases do manejo nesta microbacia.

Figura 13 – Visão das fases do manejo aplicado na microbacia (a) derrubada da vegetação nativa em 12/2009; (b) queima da vegetação em 09/12/2009; (c) plantio do capim em 15/01/2010; (d) desenvolvimento do capim em 27/04/2010



Além da cobertura arbórea e rasteira, torna-se importante destacar que há uma cobertura média ao longo do ano, de 4.969 e 4.138 kg ha⁻¹ de serapilheira, para ambas as microbacias, nativa e raleada, respectivamente. Essa quantidade de cobertura morta sobre o solo é consequência da queda natural da folhagem das espécies da caatinga, uma forma adaptativa e fisiológica da vegetação local conseguir reduzir as perdas de água por evapotranspiração. Essa folhagem que cai sobre o solo, forma uma camada de proteção sobre o mesmo (Figura 14), podendo influenciar significativamente no amortecimento do escoamento.

Figura 14 – Detalhe da cobertura morta da microbacia experimental mantida intacta



4.6 Monitoramento Hidrológico das Microbacias

Nesta tarefa realizou-se uma síntese, sobre instrumentação e medição, no qual foi produzido nos seguintes trabalhos: Alves (2008), Rodrigues (2009), Lobato (2010), Palácio (2011) e Santos (2012).

As microbacias foram equipadas com estações hidroclimatológicas, com pluviômetros, calhas Parshall, sensores de temperatura do ar e solo, sensores de umidade relativa do ar, umidade do solo e pluviógrafos automáticos. Todos os dados são coletados por meio de uma plataforma de coleta de dados (PCD) instalada em cada microbacia e programada para obtenção de dados a intervalos de cada 5 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 (RODRIGUES, 2009). Foram ainda realizados acompanhamento da umidade do solo de maneira gravimétrica, testes de infiltração e coletas de dados em campo após cada evento.

4.6.1 Precipitação

Para medição da precipitação, três estações pluviográficas foram instaladas para monitoramento dos dados pluviométricos nas microbacias avaliadas, sendo uma delas compreendendo as microbacias com caatinga nativa e raleada, outra estação na microbacia

manejada com queima/pastagem e por fim uma estação em microbacia vizinha as microbacias estudadas.

Empregou-se para medição, 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) (Figura 15a), como também, pluviômetros do tipo Ville de Paris (Figura 15b). 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. 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. Os dados nos pluviômetros Ville de Paris eram coletados, com representatividade de chuvas, com duração de 24 h, servindo como dado assistente aos do pluviógrafo de báscula. Dados complementares pluviométricos referentes à série histórica foram coletados em um posto pluviométrico na cidade de Iguatu a 8 km da área de estudo (FUNCEME, 2009).

Figura 15 – (a) Detalhe do Pluviógrafo de báscula e (b) Pluviômetros do tipo Ville de Paris instalados nas microbacias



(a)



(b)

4.6.2 Escoamento Superficial

O deflúvio superficial vem sendo monitorado através de calhas Parshall, uma para cada microbacia, sendo essas confeccionadas em fibra de vidro (Figura 16a). As calhas foram dimensionadas para uma vazão máxima provocada por um evento de chuva de 100 mm com intensidade de 50 mm h^{-1} em ausência de cobertura vegetal (ALVES, 2008) e instalada com alvenaria na lateral e fixada com concreto na parte inferior (Figura 16b). Na Figura 17a pode-se observar o posicionamento atual de uma das calhas no campo (microbacia nativa) e em funcionamento (Figura 17b).

Figura 16 – (a) Confeção das calhas Parshall em fibra de vidro e (b) instalação em campo com estrutura de alvenaria



Figura 17 – Detalhe da calha Parshall instalada em campo, (a) visão geral, (b) em funcionamento



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 18a). As placas posicionadas paralelamente definem os eletrodos do capacitor, separadas em 0,5 cm e cobertas por verniz (CRUZ et al., 2007). Os sensores foram instalados em um poço ligado através de um vaso comunicante ao interior das calhas (Figura 18b). O sensor foi desenvolvido para medir frequência (kHz), sendo então calibrado.

Figura 18 – Linígrafo de medição de nível do escoamento, (a) sensor capacitivo para monitoramento do nível de água e (b) poço tranquilizador onde é instalado o sensor de nível na calha Parshall



(a)



(b)

A partir das elevações de nível de água ou cotas registradas no linígrafo automático converteu-se posteriormente em vazão mediante equação específica de cada calha. A equação das calhas empregadas nesse estudo segue a Equação 4, calculada segundo Bernardo et al. (2006).

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

Onde:

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

W - largura do estrangulamento (cm), com valor de 47,5 para calhas;

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

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 (Equação 5):

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

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, $L s^{-1}$;

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 (Equação 6):

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

Em que:

D – representa o deflúvio (mm);

V – volume escoado (m^3);

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.

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

4.6.3 Infiltração

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 hidrológicos em microbacias.

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 19. 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 que vão desde alguns minutos a até algumas horas, dependendo da textura, estrutura e umidade. Para as microbacias nativa e raleada o tempo médio de ensaio foi de 2,5 h. Devido à pequena dimensão das unidades experimentais foi conduzido um ensaio por profundidade para cada uma das microbacias.

Figura 19 – Equipamento de medição de condutividade hidráulica saturada em campo (Amoozometer)



Também foram realizados testes de infiltração ao longo das microbacias, a Figura 20 abaixo mostra a realização pelo método do infiltrômetro de anel com carga variável. Para isso, preparou-se o local para instalação dos anéis concêntricos com auxílio de uma enxada, raspando-se a superfície do solo e eliminando a vegetação presente, sendo utilizados dois anéis metálicos. Com a régua fixada no cilindro interno e com auxílio de um cronômetro procedeu-se leituras da lâmina infiltrada nos respectivos intervalos de tempo.

Figura 20 – Anéis instalados em campo para determinação da curva de infiltração pelo método do infiltrômetro de anel com carga variável



Para as microbacias os resultados de condutividade hidráulica saturada encontram-se na Tabela 6. Os valores encontrados são compatíveis com os apresentados por Chow et al. (1988) para solos com granulometria argilosa, cujo valor limiar superior é de $0,3 \text{ mm h}^{-1}$.

Tabela 6 – Condutividade hidráulica saturada para as microbacias experimentais nativa e raleada

Local	Profundidade (cm)	
	0-30	30-60
Condutividade Hidráulica Saturada - K_{sat} (mm h^{-1})		
Caatinga Nativa	0,20	Nda
Caatinga Raleada	0,06	0,15
Queima/Pastagem	0,22	0,22

nda – dado não disponível

4.6.4 Umidade do Solo

A umidade do solo antecedente a um determinado evento pluviométrico é uma das principais variáveis que influenciam na ocorrência do escoamento superficial, sendo de

extrema importância o seu conhecimento, uma maior ou menor umidade do solo pode ser determinante na ocorrência ou não do escoamento. Com o objetivo de analisar a influência da umidade antecedente do solo no escoamento, no ano hidrológico de 2009 foram realizadas coletas de amostras periodicamente, sendo que nos anos de 2010, 2011 e 2012 as amostragens foram realizadas diariamente (com três repetições) nas quatro microbacias, e para sua determinação foi utilizado o método gravimétrico.

As amostras eram acondicionadas em latas de alumínio e estas isoladas com fita adesiva. As amostras de solo foram encaminhadas ao Laboratório de Água, Solos e Tecidos Vegetais – LABAS do IFCE - Campus Iguatu, onde eram previamente pesadas para obtenção da massa de solo úmido e levadas à estufa com temperatura de 105 °C, por um período de 24 horas. Passado esse período, o solo era novamente pesado para obtenção da massa do solo seco. De posse dos dados de massa do solo úmido e seco, a umidade foi determinada por meio da equação 8.

$$u = \left(\frac{m_u - m_s}{m_s} \right) 100 \quad (8)$$

Em que:

u – umidade do solo com base em massa (%)

m_u – massa do solo úmido (g)

m_s – massa do solo seco (g)

REFERÊNCIAS

ALBUQUERQUE, A.W. **Determinação de fatores para a equação universal de perdas de solo nas condições de Sumé-PB**. Piracicaba: Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 1997. 100p. Tese Doutorado.

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

ALBUQUERQUE, A. W.; LOMBARDI 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**, v.6, n.1, p.136-141, 2002.

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.

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.

ALMEIDA, C. L. **Impacto da recuperação de área degradada sobre as respostas hidrológicas e sedimentológicas em ambiente semiárido**. 2011. 133 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Departamento de Engenharia Agrícola, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2011.

ALVES, N. N. L. **Caracterização de micro-bacia hidrográfica experimental no semiárido 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.

ALVES, D. B., SAUSEN, T. M., LACRUZ, M. S. P. Modelagem dinâmica do escoamento superficial na área urbana de Santa Maria – RS. **Anais... XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR**, Curitiba, PR, INPE. p.5671-5678, 2011.

AMOOZEGAR - 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.

ANDRADE, E. M.; PALÁCIO, H. A. Q.; SANTOS, J. C. N.; GUERREIRO, M. J. S.; RODRIGUES, J. A. Runoff curve number for a smallforestedwatershed in a semiaridregionofBrazil. In: 21st Century Watershed Technology Conference and Workshop, Bary, Italy. **Anais...ASABE**, 2012.

ANDRADE, E. M. **Regionalization of avarege annual runoff models for ungagged watersheds in arid and semiarid regions**. 1997. 192 f. Tese (Doutorado em Recursos Naturais Renováveis) –Universidade do Arizona, 1997.

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, 2009.

ARAÚJO NETO, J. R.; PALÁCIO, H. A. Q; ANDRADE, E. M.; SANTOS, J. C. N; PINHEIRO, E. A. R. Otimização do número de curva (CN-SCS) para diferentes manejos na região semiárida, Ceará, Brasil. **RevistaIrriga**, Botucatu, Edição Especial, p. 264-279, 2012.

BALBINOT, R.; OLIVEIRA, N. K.; VANZETTO, S. C.; PEDROSO, K.; VALERIO, A. F. O papel da floresta no ciclo hidrológico em bacias hidrográficas. **AmbiênciaGuarapuava**, PR, v.4, n.1, p.131-149, Jan./Abr, 2008.

BALTAS, E.A.; DERVOS, N.A.; MIMIKOU, M.A. Technical note: determination of the SCS initial abstraction ratio in an experimental watershed in Greece. **Hydrology and Earth System Sciences**. v.11, n.6, p.1825-1829. Nov. 2007.

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.

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

BO, X.; QING-HAI, W.; JUN, F.; FENG-PENG, F.; QUAN-HOU, D. Application of the SCS-CN Model to Runoff Estimation in a Small Watershed with High Spatial Heterogeneity. **Pedosphere**. v. 21, n. 6, p. 738–749, 2011.

BOER, M., PUIGDEFÁBREGAS, J. Effects of spatially structured vegetation patterns on hillslope erosion in a semiarid Mediterranean environment: a simulation study. **Earth Surface Processes and Landforms**. v.30, p. 149–167, 2005.

BURATTO, M. V. **Construção e Avaliação de um Método de Simulação de Monte Carlo para analisar a capacidade de financiamento de empresas em financiamentos de longos prazos**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, RS, 2005.

CADIER, E. **Hidrologia das Pequenas Bacias do Nordeste Semi-Árido**: Transposição Hidrológica. Série hidrológica/ 31, SUDENE, Recife, 469 p. 1994.

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.

CANTÓN, Y.; SOLÉ-BENET, A.; VENTE, J.; BOIX-FAYOS, C.; CALVO-CASES, A.; ASENSIO, C.; PUIGDEFÁBREGAS, J. A review of runoff generation and soil erosion across scales in semiarid south-eastern Spain. **Journal of Arid Environments**, v. 75, p. 1254-1261, 2011.

CASERMEIRO, M. A.; MOLINA, J. A.; CARAVACA, M. T. D. L.; COSTA, J. H.; MASSANET, M. I. H.; MORENO, P. S. Influence of scrubs on runoff and sediment loss in soils of Mediterranean climate. **Catena**, v. 57, p. 91–107. 2004.

CASTILLO, V. M.; GÓMEZ-PLAZA, A.; MARTÍNEZ-MENA, M. The role of antecedent soil water content in the runoff response of semiarid catchments: a simulation approach. **Journal of Hydrology**, v. 284, p. 114–130, 2003.

CEBALLOS, A.; SCHNABEL, S. Hydrological behaviour of a small catchment in the dehesalanduse 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. 572 p. 1998.

COLLARES, E. G. **Avaliação de Alterações em Redes de Drenagem de Microbacias Como Subsídios ao Zoneamento Geoambiental de Bacias Hidrográficas: Aplicação na Bacia Hidrográfica do Rio Capivari– SP**. 2000. 193 f. Tese (Doutorado em Geotecnia). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos – SP, 2000.

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.

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.

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

EVANS J., OLSON D. **Introduction to Simulation and Risk Analysis**, United Kingdom, Prentice Hall, 1998.

FIGUEIREDO, J. V. **Início da geração do escoamento superficial em uma bacia semiárida em Caatinga preservada**. 84 f. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola – Manejo e Conservação de Bacias Hidrográficas no Semiárido) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza – CE, 2011.

GAO, Y.; ZHU, B.; MIAO, C. Y.; ZHANG, J. Z. Application of SCS model to estimate the volume of rainfall runoff in sloping field of purple soil. **Chin. Agr.Sci. Bull.**, v. 22, n. 11, p. 396–400, 2006.

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.

GOMES, F. E. F.; PALÁCIO, H. A. Q.; ARAÚJO NETO, J. R.; BRASIL, P. P. Comparativo da umidade do solo de duas microbacias na caatinga, em relação ao manejo. In: Congresso Norte e Nordeste de Pesquisa e Inovação, Palmas, Tocantins. **Anais...** CONNEPI, Tocantins, 2012.

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

HAWKINS, R.H., JIANG, R., WOODWARD, D.E., HJELMFELT, A.T., VAN MULLEM, J.A., QUAN, Q.D. **Runoff curve number method: examination of the initial abstraction ratio**. Proceedings of the Second Federal Interagency Hydrologic Modeling Conference, Las Vegas, Nevada. U.S. Geological Survey, Lakewood, Colorado. CD-ROM. 2002

IMESON, A.C., PRINSEN, H.A.M. Vegetation patterns as biological indicators for identifying runoff and sediment source and sink areas for semi-arid landscapes in Spain. **Agriculture Ecosystems & Environment**, v. 104, p. 333–342. 2004.

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

IZÍDIO, N. S. C. **Interceptação da chuva pela vegetação da caatinga no semiárido cearense**. 2011. 62 f. Monografia (Tecnologia em Irrigação e Drenagem). Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará, Campus Iguatu, Iguatu, Ceará, 2011.

JIN, H.; SUN, X. H.; LI, Y. B. Application of SCS model in Lanhe watersheds. **J. Taiyuan Univ. Technol.**, v. 34, n. 6, p. 735–736, 2003.

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.

LIMA, C. A. **Características das chuvas e da erosão sob diferentes usos do solo no Semiárido**. 2011. 75 f. Monografia (Tecnologia em Irrigação e Drenagem). Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará, Campus Iguatu, Iguatu, Ceará, 2011.

LIMA, H. M.; VARGAS, H. CARVALHO, J.; GONÇALVES, M.; CAETANO, H. Comportamento hidrológico de bacias hidrográficas: integração de métodos e aplicação a um estudo de caso. **REM: R. Esc. Minas, Ouro Preto**, v. 60, n. 3, p. 525-536, 2007.

LIU, X. Z.; LI, J. Z. Application of SCS model in estimation of runoff from small watershed in Loess Plateau of China. **Chin. Geogra. Sci.**, v. 18, n. 3, p. 235–241, 2008.

LOBATO, F. A. O. **Perdas de solo e nutrientes por erosão hídrica para diferentes alturas pluviométricas em área de caatinga do Ceará**. 56 f. 2010. Monografia (Agronomia) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza – CE, 2010.

MAYOR, A. G.; BAUTISTA, S.; BELLOT, J. Scale-dependent variation in runoff and sediment yield in a semiarid Mediterranean catchment. **Journal of Hydrology**, v. 397, p. 128–135, 2011.

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.

MEDEIROS, P. H. A. **Processos hidrossedimentológicos e conectividade em bacia semiárida: modelagem distribuída e validação em diferentes escalas**. 2009. 82 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil (Recursos Hídricos) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE, 2009.

MELLO, C. R.; LIMA, J. M.; SILVA, A. M.; LOPES, D. Abstração inicial da precipitação em microbacia hidrográfica com escoamento efêmero. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.7, n.3, p.494-500, 2003.

MISHRA, S.K.; SINGH, V.P. Long-term hydrological simulation based on the Soil Conservation Service curve number. **Hydrological Processes**, v.18, n.7, p.1291-1313, 2004.

MISHRA, S. K., TYAGI, J. V., SINGH, V. P. AND SINGH, R. SCS-CN-based modeling of sediment yield. **Journal of Hydrology**.v. 324, n. (1–4), p. 301–322, 2006.

MUGABE, F. T.; HODNETT, M.; SENZANJE, A. Comparative hydrological behaviour of two small catchments in semi-arid Zimbabwe. **Journal of Arid Environments**, doi: 10.1016/j.jaridenv.2006.11.016. 2007.

MUSIAKE, K. Hydrology and water resources in monsoon Asia: a consideration of the necessity of establishing a standing research community of hydrology and water resources in the Asia Pacific region. **Hydrological Processes**, v. 17, n. 14, p. 2701–2709, 2003.

NEARING, M. A.; DEER-ASCOUGH, L.; LAFLEN, J.M. Sensitivity analysis of the WEPP hillslope profile erosion model. **Transactions of the ASAE**, v.33, n.3, p.839-849, 1990.

ONDA, Y.; KATO, H. TANAKA, Y.; TSUJIMURA, M.; DAVA, G.; OYUNBAATAR, D. Analysis of runoff generation and soil erosion processes by using environmental radionuclides in semiarid areas of Mongolia. **Journal of Hydrology**, v. 333, p. 124– 132, 2007.

PALÁCIO, H. A. Q. **Avaliação emergética de microbacias hidrográficas do semiárido submetidas a diferentes manejos**. 150 f. 2011. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola – Manejo e Conservação de Bacias Hidrográficas no Semiárido) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza – CE, 2011.

PEEL, M. C.; MCMAHON T. A.; FINLAYSON B. L.; Continental differences in the variability of annual runoff-update and reassessment. **Journal of Hydrology**, v.295, n. (1–4), p. 185–197, 2004.

PONCE, V. M. AND HAWKINS, R. H. Runoff curve number: has it reached maturity? **J. Hydrol. Eng.**, v. 1, n. 1, p. 11–19, 1996.

RAN, Q.; SU, D.; LI, P.; HE, Z. Experimental study of the impact of rainfall characteristics on runoff generation and soil erosion. **Journal of Hydrology**, v. 424–425, p. 99–111, 2012.

RAWLS, W. J.; AHUJA, L. R.; BRAKENSIEK, D. L.; SHIRMOHAMMADI, A. Infiltration and soil water movement. In: Maidment, D. R. (org.). Handbook of hydrology. New York: McGraw-Hill Inc, 1993. p.1-51.

RIGHETTO, A. M. (org.). **Implantação de Bacias Experimentais no Semi-árido. Relatório Técnico**, FINEP/FUNPEC, Natal. 2004.

RODRIGUES, J. O.; ANDRADE, E. A.; PALÁCIO, H. A. Q.; MENDONÇA, L. A. R.; SANTOS, J. C. N. Sediment loss in semiarid small watershed due to the land use(no prelo). **RevistaCiênciaAgronômica**, 2013.

SAHU, R. K., MISHRA, S. K. AND ELDHO, T. I. Comparative evaluation of SCS-CN inspired models in applications to classified datasets. **Agr. Water Manage**, v. 9, n. 5, p.749–756, 2010.

SANDSTRÖM, K. Hydrochemical deciphering of streamflow generation in semi-arid east Africa. **Hydrological Processes**,v. 10, n. 5, p. 703–720, DOI:10.1002/(SICI)1099-1085(199605)10:5. 1996.

SANTOS, J. C. N. **Mensuração da erosão do solo no semiárido em diferentes usos de terras e escalas espaciais**. 102 f. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola – Manejo e Conservação de Bacias Hidrográficas no Semiárido) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza – CE, 2012.

SANTOS, J. C. N.; PALÁCIO, H. A. Q.; ANDRADE, E. M.; MEIRELES, A. C. M.; ARAÚJO NETO, J. R. Runoff and soil and nutrient losses in semiarid uncultivated fields. **RevistaCiênciaAgronômica**, v. 42, n. 3, p. 813-820, 2011.

SHI, Z. H.; CHEN, L. D.; FANG, N. F.; QIN, D. F.; CAI, C. F. Research on the SCS-CN initial abstraction ratio using rainfall-runoff event analysis in the Three Gorges Area, China. **Catena**, v. 77, p. 1–7, 2009.

SINGH, V. P. ed. Computer models of watershed hydrology. Colorado, **water resources publications**, p. 311-366, 2002.

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.

TORRES, I. B. T.; AMATYA, D. M.; SUN, G.; CALLAHAN, T. J. Seasonal rainfall-runoff relationships in a lowland forested watershed in the southeastern USA. **Hydrological Processes**, v. 25, p. 2032–2045, 2011.

TUCCI, C. E. M. Escoamento superficial. In: Tucci, C.E.M. (org.) **Hidrologia: ciência e aplicação**. 5. ed. Porto Alegre: ABRH/ Editora UFRGS, 2009, p. 391-441.

TYAGI, J. V.; MISHRA, S. K.; SINGH, R.; SINGH, V. P. SCS-CN based time-distributed sediment yield model. **Journal of Hydrology**, v. 352, p. 388–403, 2008.

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

WAINWRIGHT, J., PARSONS, A. J., ABRAHAM, A. D. Plot-scale studies of vegetation, overland flow and erosion interactions: case studies from Arizona and New Mexico. **Hydrological Processes**, v. 14, p. 2921–2943, 2000.

WANG, Y. AND HUANG, M. B. Application of the SCS-CN method on runoff estimation in small watershed on Loess Plateau. **Sci. Soil Water Conserv.** (in Chinese). v. 6, n. 6, p. 87–91, 2008.

WEI, W. et al. The effect of land uses and rainfall regimes on runoff and soil erosion in the semi-arid loess hilly area, China. **Journal of Hydrology**, v. 335, p. 247–258, 2007.

WIEGAND, M. C. **Proposta metodológica para estimativa da produção de sedimentos em grandes bacias hidrográficas: estudo de caso Alto Jaguaribe, CE**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE, Brasil. 2009.

WOO, M. K.; LIU, C. Mountain hydrology of Canada and China: a case study in comparative hydrology. **Hydrological Processes**, v. 8, n. 6, p. 573–587, 2006.

ZHANG, X. Y.; MENG, F.; DING, N. Application of SCS model to estimating the quantity of runoff of small watershed in semi-arid or arid region. **Res. Soil Water Conserv.**, v. 10, n. 4, p. 172–174, 2003.

ZHANG, M. H.; WANG, X. Y.; QIN, F. L. Application of SCS model to estimate the quantity of rainfall runoff of small watershed in Shixia, Miyun County. **J. Capital Norm. Univ.** (Nat. Sci. Ed.), v. 25 (S1), p. 155–158, 2004.

CAPÍTULO 1

ANALISE COMPARATIVA DO ESCOAMENTO SUPERFICIAL DE MICROBACIAS EXPERIMENTAIS EM CLIMA SEMIÁRIDO TROPICAL

RESUMO

O objetivo deste trabalho foi avaliar o comportamento hidrológico de duas microbacias hidrográficas com características similares localizadas no semiárido brasileiro, bem como quantificar o efeito do manejo da vegetação na geração do escoamento para condições de pequena escala. O trabalho foi desenvolvido em duas unidades experimentais, uma coberta com vegetação nativa e outra com vegetação raleada, com áreas de respectivamente 2,06 e 1,15 ha, situadas no município de Iguatu, Ceará, durante as estações chuvosas dos anos de 2009, 2010, 2011 e 2012. O estudo demonstrou que o manejo de raleamento da vegetação promoveu redução na lamina drenada, com um coeficiente de escoamento de 9,0% para a microbacia com a vegetação Caatinga nativa e 5,6% para a microbacia com vegetação raleada. A influência do manejo foi observada também no pico de descarga das microbacias, $3,73 \text{ L s}^{-1} \text{ ha}^{-1}$ para a raleada contra $4,42 \text{ L s}^{-1} \text{ ha}^{-1}$ para a nativa, uma diferença de 15,6 % entre os manejos. O surgimento do extrato herbáceo em decorrência do raleamento da vegetação gerou uma redução do escoamento superficial e menores picos de descargas. Tal resposta hidrológica aponta um manejo adequado para produção de pastagem e retenção de umidade no solo, o que promove a conservação dos recursos naturais. O manejo aplicado também influenciou nos valores de variáveis, umidade antecedente do solo e intensidades de precipitação pluviométrica, para que ocorresse ou não escoamento superficial.

Palavras-chave: Escoamento Superficial. Ação Antrópica. Umidade do Solo. Intensidade de Precipitação. Semiárido.

CHAPTER 1

COMPARATIVE ANALYSIS OF RUNOFF IN EXPERIMENTAL CATCHMENT IN SEMIARID TROPICAL CLIMATE

ABSTRACT

The objective of this study was to evaluate the hydrological behavior of two catchments with similar characteristics located in the Brazilian semiarid region, as well as quantify the effect of the vegetation management in generating runoff conditions at micro-scale. This work was developed in two experimental catchments, one covered with native vegetation and other with vegetation thinned, with areas of 2.06 and 1.15 ha, respectively, located in the Iguatu County, Ceará, during the rainy seasons of the years 2009, 2010, 2011 and 2012. The study demonstrated that the management of the vegetation thinned promoted the reduction in the runoff, with a runoff coefficient of 9.0% for the catchment with native vegetation and 5.6% for the catchment with vegetation thinned. The influence of the management was also observed at the peak flow, with $3.73 \text{ L s}^{-1} \text{ h}^{-1}$ to vegetation thinned against $4.42 \text{ L s}^{-1} \text{ h}^{-1}$ for the native vegetation, a difference of 15.6% between the managements. The rise of herbal extract due to the thinning of vegetation led to a reduction of runoff and lower peak flows. Such hydrologic response indicates an adequate management for pasture production and moisture retention in the soil, which promotes the conservation of natural resources. The management applied also influenced the values of hydrological variables, antecedent soil moisture and rainfall intensities, regarding to the occurrence of runoff.

Keywords: Runoff. Anthropic action. Soil Moisture. Intensity of rainfall. Semiarid Environment.

1 INTRODUÇÃO

A intensificação da exploração do homem sobre os recursos naturais no semiárido brasileiro tem causado a degradação do solo, dos recursos hídricos, remoção da vegetação e perda da biodiversidade, que somados aos fatores climáticos podem resultar em modificações significativas dos processos hidrológicos, notadamente no processo chuva-deflúvio. A magnitude do processo chuva-deflúvio depende de fatores como: intensidade da precipitação, geologia, permeabilidade do terreno, condição de umidade antecedente do solo, duração e frequência da precipitação, tipo de cobertura vegetal, área da bacia de drenagem, distribuição espacial e temporal da precipitação, geometria dos rios e riachos e declive dos terrenos (CANTÓN et al., 2001; KANG et al., 2001; CASTILLO et al., 2003; COSTA, 2007; CANTÓN et al., 2011; TORRES et al., 2011; FIGUEIREDO, 2011; RAN et al., 2012 e RODRIGUES et al., 2013).

Dos fatores mencionados, a cobertura vegetal é uma das variáveis de maior influência na resposta hidrológica de uma bacia hidrográfica (GARCIA-RUIZ et al. 2008; MUÑOZ-ROBLES et al.; 2011). A eliminação do dossel vegetal torna a superfície do solo mais exposta a ação direta das gotas das chuvas sobre o solo, bem como, ao livre movimento da água na superfície diminuindo o tempo de oportunidade de infiltração e consequentemente produzindo uma maior geração de escoamento superficial (CASERMEIRO et al., 2004; BARTLEY et al., 2006)

É comum a prática de desmatamento das florestas do semiárido brasileiro, cujo bioma predominante é a Caatinga, em função das pressões demográficas pela demanda crescente de produtos agrícolas e florestais, como forma de garantir áreas úteis para produção agrícola e pecuária. Essas práticas da agricultura tradicional que incluem o desmatamento total, a queimada da madeira, cultivo de até dois anos e pousio (ausência de cultivo ou outro uso da terra) para recomposição parcial da vegetação nativa, vem causando, aos ecossistemas do semiárido, vultosas perdas em seus recursos naturais. No entanto a adoção de técnicas de manejo da vegetação que busque uma exploração sustentável, seja para produção de alimento, pastagem ou madeireira, ainda são pouco estudadas e conhecidas e adotadas no semiárido brasileiro (PALÁCIO, 2011).

Apesar do desenvolvimento de alguns estudos conduzidos no semiárido sobre alterações de microbacias, novas pesquisas devem ser implementadas no sentido de gerar

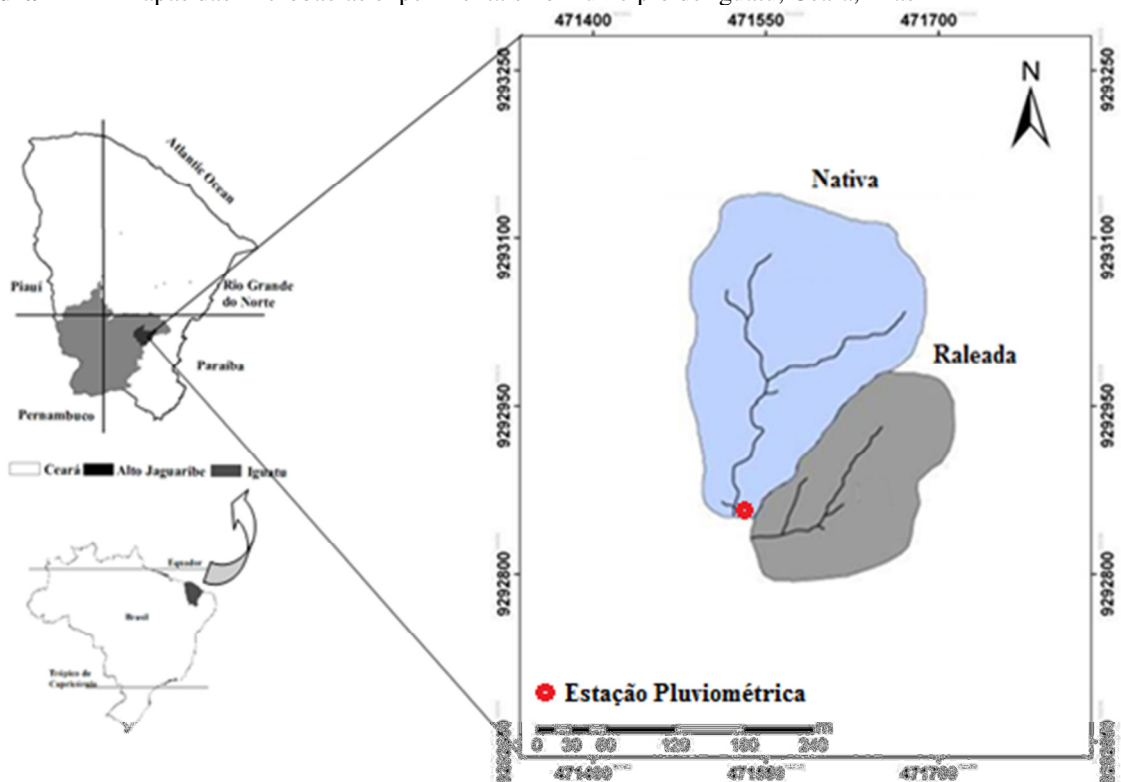
informações em escala de microbacias rurais sobre o escoamento efêmero, principalmente investigando a influência do homem na alteração dos processos naturais (escoamento superficial, evaporação, infiltração, temperatura, erosão e transporte de sedimentos etc.). Os desafios desses estudos têm sido principalmente devido à dificuldade de um monitoramento contínuo, de forma a gerar informações qualitativas e quantitativas consistentes do processo chuva-deflúvio e dos diversos fatores que exercem influência sobre o mesmo.

Nesse contexto, objetivou-se, em microbacias com características similares localizadas no semiárido brasileiro, quantificar o efeito do manejo da vegetação na geração do escoamento, bem como, gerar informações das principais variáveis hidrológicas envolvidas no processo de chuva-deflúvio.

2 MATERIAL E MÉTODOS

A área experimental localiza-se no município de Iguatu, Ceará, Brasil, pertencente ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE), Campus Iguatu (Figura 1), sendo composta por duas microbacias adjacentes e similares.

Figura 121 – Mapas das microbacias experimentais no município de Iguatu, Ceará, Brasil



O clima da região é do tipo BSw'h' (Semiárido quente), de acordo com a classificação climática de Köppen, com temperatura média sempre superior a 18 °C no mês mais frio. O Índice de Aridez elaborado por Thornthwaite (1948) é de 0,44 classificando-se como semiárido. A evapotranspiração potencial média é de 1.988 mm.ano⁻¹, a precipitação média histórica no município de Iguatu é de 867 ± 304 mm, com 85% concentrados no período de janeiro-maio e dos quais cerca de 30% são registrados no mês de março (AGRITEMPO, 2011), expressando a concentração das chuvas em cinco meses do ano.

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.

O solo da área experimental é classificado como Vertissolo Ebânico Carbonático Típico de acordo com a classificação da Embrapa (2006). A classe textural é franco argilosa com 27,4% de área, 42,5 % de silte e 30% de areia, com uma condutividade hidráulica saturada inferior a 0,2 mm.h⁻¹. Devido ao tipo de argila presente nos solos (2:1, grupo montmorilonita) é comum o surgimento de rachaduras na superfície nas épocas secas do ano, e encharcamento no período chuvoso, conforme averiguações de Alves (2008).

Uma das bacias foi mantida durante todo o período de estudo com a cobertura vegetal nativa, floresta caducifólia, Caatinga (Figura 2a), a qual está inserido no domínio Semiárido e abrange cerca de 54% da região Nordeste do Brasil (ANDRADE et al., 2005). A segunda microbacia teve a sua cobertura vegetal raleada durante todo o período de estudo (Figura 2b), sendo eliminadas as árvores com diâmetro inferior a 10 cm. Este manejo promoveu uma maior penetração de luz com consequente desenvolvimento do extrato herbáceo. O raleamento da vegetação é ainda um manejo pouco adotado por pequenos produtores rurais do semiárido brasileiro para produção de pastagem. As características morfométricas da microbacia experimental estudada podem ser verificadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Características morfométricas das microbacias experimentais estudadas

Características	Unid.	Uso da terra	
		Vegetação Nativa	Vegetação Raleada
Área da bacia	ha	2,06	1,15
Perímetro	m	594,50	478,35
Comprimento do talvegue	m	183,87	120,54
Comprimento do curso principal	m	252,11	147,18
Comprimento da bacia	m	204,20	188,17
Declividade da bacia	%	10,59	8,72
Fator de forma	-	0,49	0,32
Coefficiente de compacidade	-	1,16	1,25
Densidade de drenagem	m ha ⁻¹	192,59	153,80
Tempo de concentração	h	0,06	0,05
Extensão média do escoamento	m	20,50	19,50
Sinuosidade do curso principal	-	2,06	1,20

(ALVES, 2008)

Figura 2 - Detalhes da vegetação herbácea nas microbacias experimentais no período chuvoso: (a) Caatinga – Vegetação nativa em 07-03-2011 (b) Vegetação raleada em 06-04-2009

O estudo ocorreu durante as estações chuvosas dos anos de 2009, 2010, 2011 e 2012. O monitoramento hidrológico das microbacias experimentais foi realizado a partir de uma estação automática em cada microbacia, com registro a cada cinco minutos, equipada com pluviógrafos e calha Parshall, responsável pela medição do deflúvio superficial (Figura 3). Para medição do nível da água foram instalados linígrafo automáticos e a partir das cotas registradas no sensor converteu-se a altura da água em vazão mediante equação específica da calha com seus respectivos hidrogramas.

Figura 3 – (a) Modelo do pluviógrafo e (b) calha Parshall instalados nas microbacias experimentais monitoradas em 19-03-2008



O monitoramento da umidade antecedente do solo nas microbacias foi realizado diariamente com três repetições para cada microbacia na profundidade de 0-15 cm empregando-se o método gravimétrico. As amostras foram acondicionadas em latas de alumínio e estas isoladas com fita adesiva e encaminhadas ao Laboratório de Água, Solos e Tecidos Vegetais – LABAS do IFCE - Campus Iguatu, onde eram previamente pesadas para obtenção da massa de solo úmido e levadas à estufa com temperatura de 105° C, por um período de 24 horas.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Durante o período de estudo (2009-2012) constatou-se de forma alternada, 2 anos com pluviosidade acima da média histórica da região, o ano de 2009 com total de chuva precipitada de 1.011,4 mm e 2011 com 1.416,8 mm e 2 anos com valores abaixo da média histórica, o ano de 2010 com 717,4 mm e 2012 com 807,5 mm (Tabela 2). Do total de 198 eventos de precipitação pluviométrica registrados nas microbacias, 75 geraram escoamento na microbacia com vegetação nativa e 62 na microbacia com vegetação raleada, representando um percentual de 38% para a microbacia com nativa e 31% para a microbacia raleada. Considerando a lâmina escoada para os anos em estudo nas microbacias, os menores valores foram observados na microbacia com vegetação raleada com 254,6 mm em comparação com a microbacia nativa com 389 mm, uma diferença significativa de 34,5 % de perda de água

entre os manejos de vegetação raleada e nativa. Desse modo, o coeficiente de escoamento anual médio para as microbacias é de 9,0% para a microbacia com vegetação nativa e 5,6% para a microbacia com vegetação raleada. Considerando a similaridade fisiográficas entre as microbacias hidrográficas estudadas (Tabela 1), essas menores lâminas escoadas na microbacia raleada apontam a influência do manejo da vegetação nas respostas hidrológicas.

A retirada das árvores com diâmetro inferior a 10 cm no processo de raleamento favorece a maior penetração de luz solar pelo dossel das árvores, com consequente germinação do banco de sementes herbáceas presente na cobertura rasteira do solo. O maior desenvolvimento da vegetação herbácea na microbacia raleada (Figura 2b) em relação à vegetação nativa, (Figura 2a) promove um aumento na taxa de infiltração da água no solo e uma redução das perdas de água por escoamento superficial. Dessa forma, o desenvolvimento da cobertura vegetal herbácea, que cobriu praticamente toda a superfície do solo da microbacia raleada atenua o impacto direto das gotas da chuva, promove uma maior resistência ao fluxo superficial da água (THOMAZ, 2009) e reduz o escoamento superficial. Resultados que expressam o importante papel que a cobertura vegetal herbácea pode desempenhar no controle das perdas de água, principalmente quando se considera a irregularidade e a baixa precipitação pluvial de uma região semiárida (ALBUQUERQUE et al., 2001).

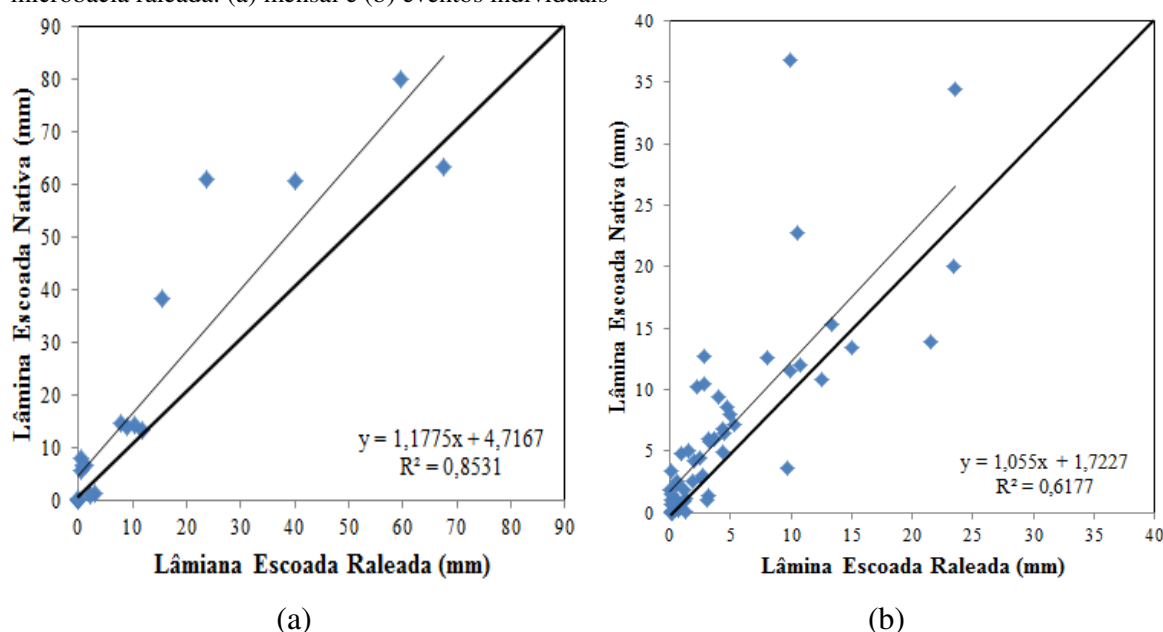
Tabela 2 – Síntese hidrológica das microbacias experimentais para o período de estudo (2009-2012)

Microbacia		Nº eventos chuvosos	Nº eventos com escoamento	P (mm)	Pe (mm)	C evento (%)	C anual (%)
Vegetação Nativa	2009	61	25	1.011,4	104,2	14,0	10,3
	2010	45	7	717,4	15,1	6,1	2,1
	2011	58	26	1.416,8	187,5	15,7	13,2
	2012	34	17	807,5	82,2	10,8	10,2
	Total	198	75	3.953,1	389,0	11,7	9,0
Vegetação Raleada	2009	61	24	1.011,4	73,6	10,3	7,3
	2010	45	5	717,4	11,3	3,7	1,6
	2011	58	22	1.416,8	143,3	13,0	10,1
	2012	34	11	807,5	26,4	6,8	3,2
	Total	198	62	3953,1	254,6	8,5	5,6

*P= precipitação anual; Pe=escoamento anual; C evento= coeficiente de escoamento médio dos eventos geradores de escoamento; C anual= coeficiente de escoamento anual (Pe/P)

As lâminas escoadas na microbacia com vegetação nativa e raleada estão relacionadas na Figura 4. Traçando a relação mensal entre as lâminas escoadas verifica-se na Figura 4a que a maior fração dos pares de pontos (85% dos meses) está acima da reta 1:1 o que evidencia que os maiores escoamentos são para a microbacia nativa em praticamente todos os meses, exceto para os meses janeiro de 2009, março de 2010 e abril de 2011. Mesma tendência foi verificada para a relação entre eventos Figura 4b, sendo que 78% dos pares de eventos apresentaram menores escoamentos na microbacia raleada do que na nativa. Esses elevados percentuais de maiores eventos e meses com maiores escoamentos na microbacia com vegetação nativa em comparação com a microbacia raleada confirma a eficácia na redução do escoamento com o manejo do raleamento para produção de pastagem. Esse comportamento nas respostas hidrológicas das microbacias mostra claramente o papel da cobertura vegetal na retenção e minimização das perdas de água por escoamento; resultado este que demonstra que a cobertura vegetal é um fator chave sobre a redução da lâmina escoada, corroborando com resultados de Bartley et al. (2006) e Garcia-Ruiz et al. (2008); Muñoz-Robles et al. (2011), que verificaram a importância da vegetação sobre o deflúvio em bacias hidrográficas. Autores como Wainwright et al. (2000) e Casermeiro et al. (2004) verificaram que em áreas coberta com vegetação a resposta geral tem sido a redução significativa de taxas de escoamento superficial, e as maiores diferenças nas taxas de escoamento está relacionada não somente com o total da cobertura vegetal, mas também com o resultado de diferenças da estrutura e na fisionomia das plantas (extrato herbáceo ou arbóreo), que provoca diferentes valores de interceptação da chuva.

Figura 4 - Relação em os valores de lâmina escoada medida na microbacia nativa versus a lâmina escoada na microbacia raleada: (a) mensal e (b) eventos individuais



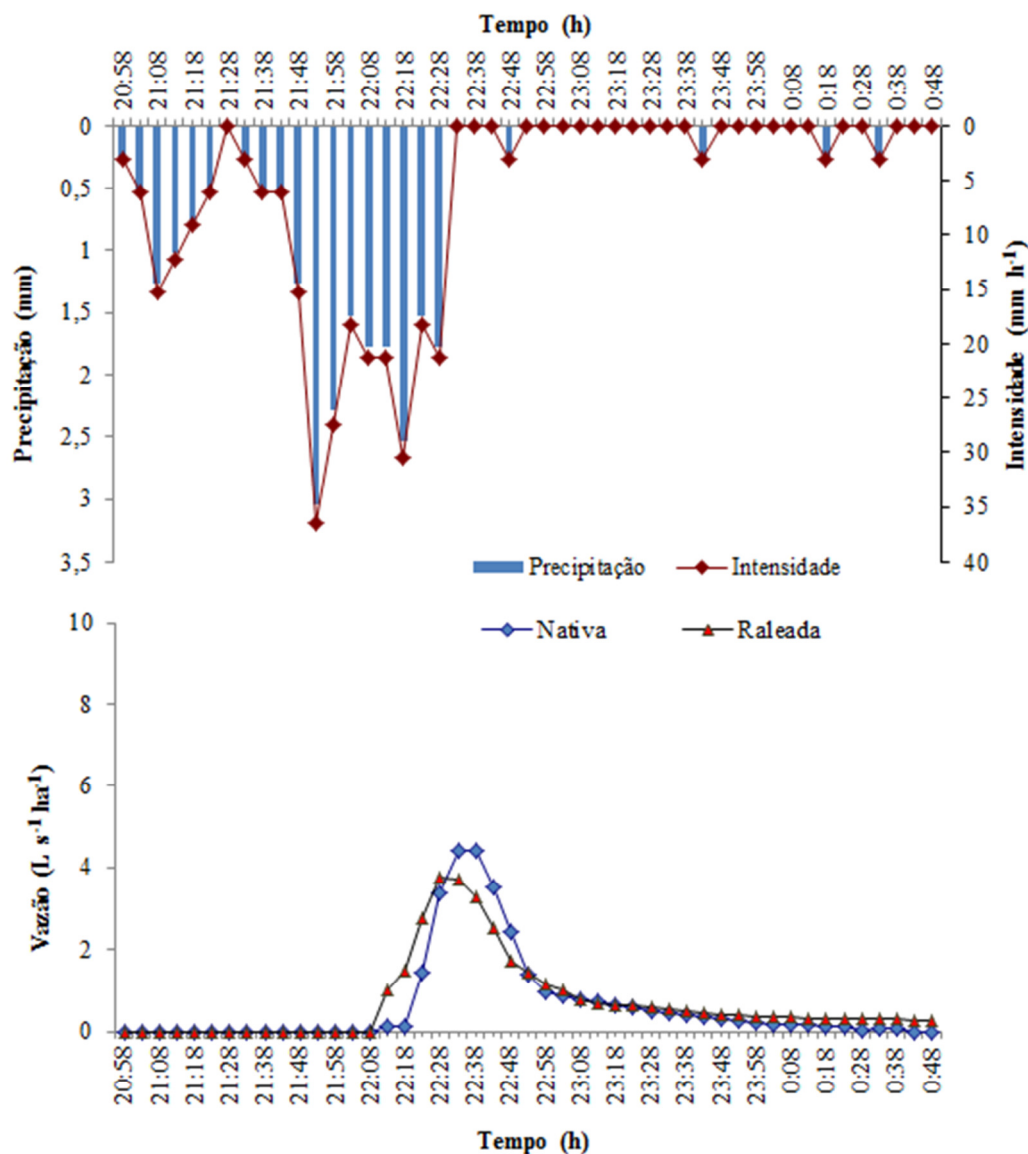
Para verificar a influência do manejo da vegetação no comportamento do hidrograma em ambas as microbacias, foram tomados para análises três hidrogramas de acordo com as classes de precipitação $P < 30$ mm, 30-50 mm e > 50 mm. As características dos eventos selecionados: precipitação, intensidade máxima em 30 minutos, coeficiente de escoamento e umidade antecedente do solo das microbacias com vegetação nativa e raleada encontram-se na Tabela 3. Verifica-se que o coeficiente de escoamento na microbacia com vegetação nativa em todos os eventos foi superior ao da microbacia raleada em até 100% do valor. Os valores de umidade antecedente do solo da microbacia com vegetação raleada, para esses eventos, foram superiores ao da microbacia com vegetação nativa, mostrando que esse manejo se mostra mais eficiente na conservação de umidade na camada superficial do solo do que o manejo natural, o que foi verificado em estudo realizado Gomes et al. (2012) para essas microbacias em mais de 89 % dos eventos a umidade na microbacia com vegetação raleada foi superior ao da microbacia com vegetação nativa.

Tabela 3 – Característica dos eventos para os hidrogramas selecionados

Classes	Eventos	P (mm)	I ₃₀ (mm/h)	C (%) Nativa	C (%) Raleada	Umidade Antecedente do Solo (%) Nativa	Umidade (%) Raleada
<30 mm	29-mar-10	28,7	25,9	4,9	3,9	25,4	35,4
30-50 mm	28-fev-11	39,0	92,4	5,7	2,6	29,0	31,2
>50 mm	01-fev-11	66,1	64,4	34,4	15,9	35,6	36,1

Os primeiros hidrogramas analisados foram para o evento do dia 29-mar-10 (Figura 5). Por se tratar de cursos efêmeros e nascentes em regiões semiáridas o escoamento de base pode ser considerado desprezível (ARAÚJO e PIEDRA, 200; SANDSTRÖN, 1996). Verifica-se que os hidrogramas não diferem quanto à forma, e a microbacia raleada apresentou resposta quase que imediata ao pico de intensidade, já a microbacia nativa apresentou resposta cerca de 10 minutos após a resposta da raleada, provavelmente isso se dá devido ao menor tempo de concentração da bacia que apesar da vazão específica desconsiderar a área na sua medida, como a microbacia raleada é menor a água chega mais rápido ao exutório. A influência do manejo foi observada na vazão de pico das microbacias, com o amortecimento de $3,73 \text{ L s}^{-1} \text{ ha}^{-1}$ para a raleada, contra $4,42 \text{ L s}^{-1} \text{ ha}^{-1}$ para a nativa, uma diferença de 15,6 % entre os manejos, evidenciando mais uma vez que a 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 com isso influenciar na disponibilidade desse recurso. Além deste fator, a microbacia nativa apresenta também uma rede de drenagem bem mais definida que a raleada, podendo assim, facilitar a canalização do fluxo, contribuindo para elevação do pico do hidrograma como já verificado por Rodrigues et al. (2013).

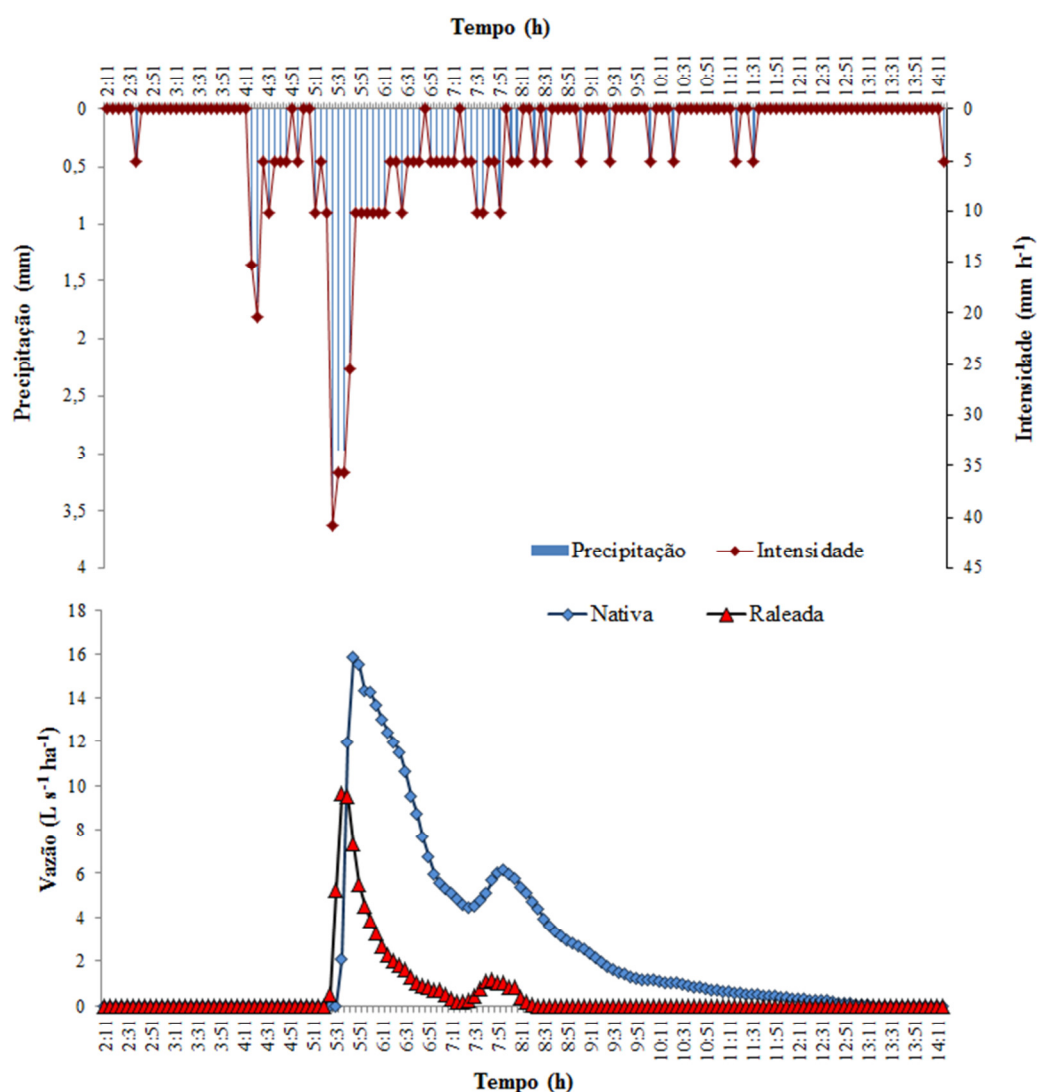
Figura 5 – Hidrogramas das microbacias nativa e raleada e características da precipitação para o evento do dia 29 de março de 2010



O Segundo par de hidrograma analisado foi o evento do dia 28-2011 (Figura 6). Também para este evento, a microbacia nativa apresentou uma resposta logo após iniciado o deflúvio na microbacia raleada, ambas as microbacias responderam quase que imediata ao pico de intensidade da chuva. Destaca-se que na recessão do hidrograma, com condições de alta umidade do solo, intensidade pluviométrica de aproximadamente 10 mm h⁻¹, foi suficiente para retomar o escoamento e atingir um segundo pico de vazão. Constatando assim que variações na intensidade da precipitação pluviométrica foram acompanhadas por mudanças rápidas na lâmina escoada. Cantón et al. (2001) também observaram esse fenômeno em microbacias no semiárido espanhol e Costa (2007) para o semiárido brasileiro. Infere-se,

devido a essa efemeridade, que o mecanismo de geração de deflúvio superficial predominante é o hortoniano. Ainda analisando esse evento, constatou-se um maior valor de descarga máxima na microbacia nativa em comparação a raleada, conforme constatado nos dois picos do hidrograma. Devido à menor dimensão da área de drenagem e declividade da raleada, o maior valor de pico de descarga reforça a análise da Figura 5, e acredita-se expressar o efeito da ação antrópica na modificação do comportamento hidrológico dessa bacia como consequência das alterações na cobertura vegetal devido ao tratamento aplicado (CASERMEIRO et al., 2004).

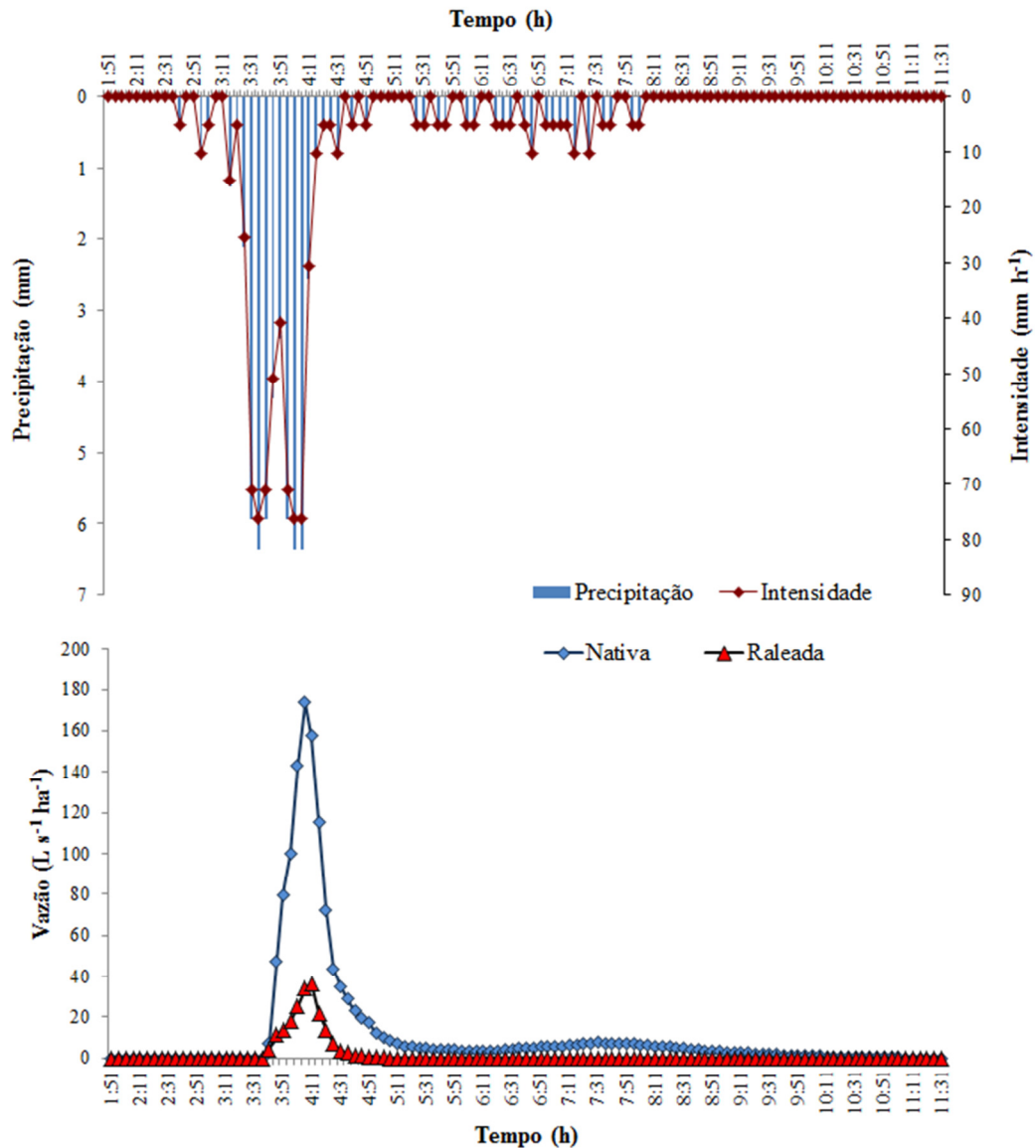
Figura 6 – Hidrogramas das microbacias nativa e raleada e características da precipitação para o evento do dia 28 de fevereiro de 2011



O terceiro par de hidrograma analisado foi o evento de maior magnitude do dia 01 de fevereiro de 2011 (Figura 7). Esse evento apresentou um total precipitado de 66,14 mm e

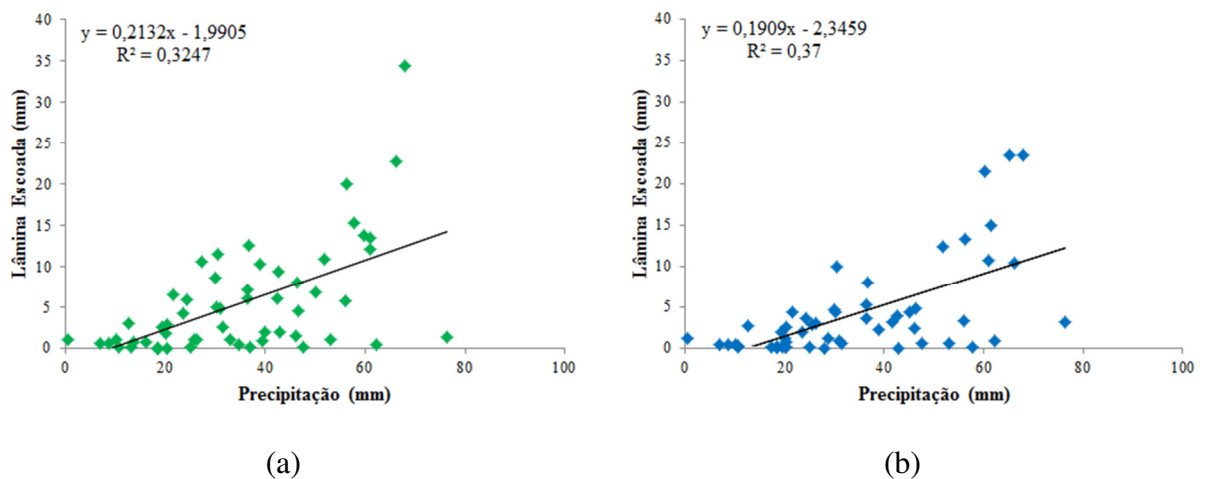
as vazões de pico $173,7 \text{ L s}^{-1} \text{ ha}^{-1}$ para a microbacia com vegetação nativa e $36,6 \text{ L s}^{-1} \text{ ha}^{-1}$ para a microbacia com vegetação raleada, uma diferença de mais de quatro vezes superior o valor de vazão de pico da microbacia nativa. Outro comportamento dos hidrogramas, influenciados pelo manejo aplicado nas microbacias são as curvas de recessão, que caracterizam a parte decrescente de um hidrograma após um evento de chuva. Observa-se que a microbacia com vegetação raleada apresenta uma curva de recessão mais atenuada com menores valores de vazões, em comparação à microbacia com vegetação nativa, notadamente para os maiores eventos (Figura 6 e 7), sendo que para o evento de menor magnitude (Figura 5) a recessão de ambas as microbacias foram próximas.

Figura 7 – Hidrogramas das microbacias nativa e raleada e características da precipitação para o evento do dia 01 de fevereiro de 2011



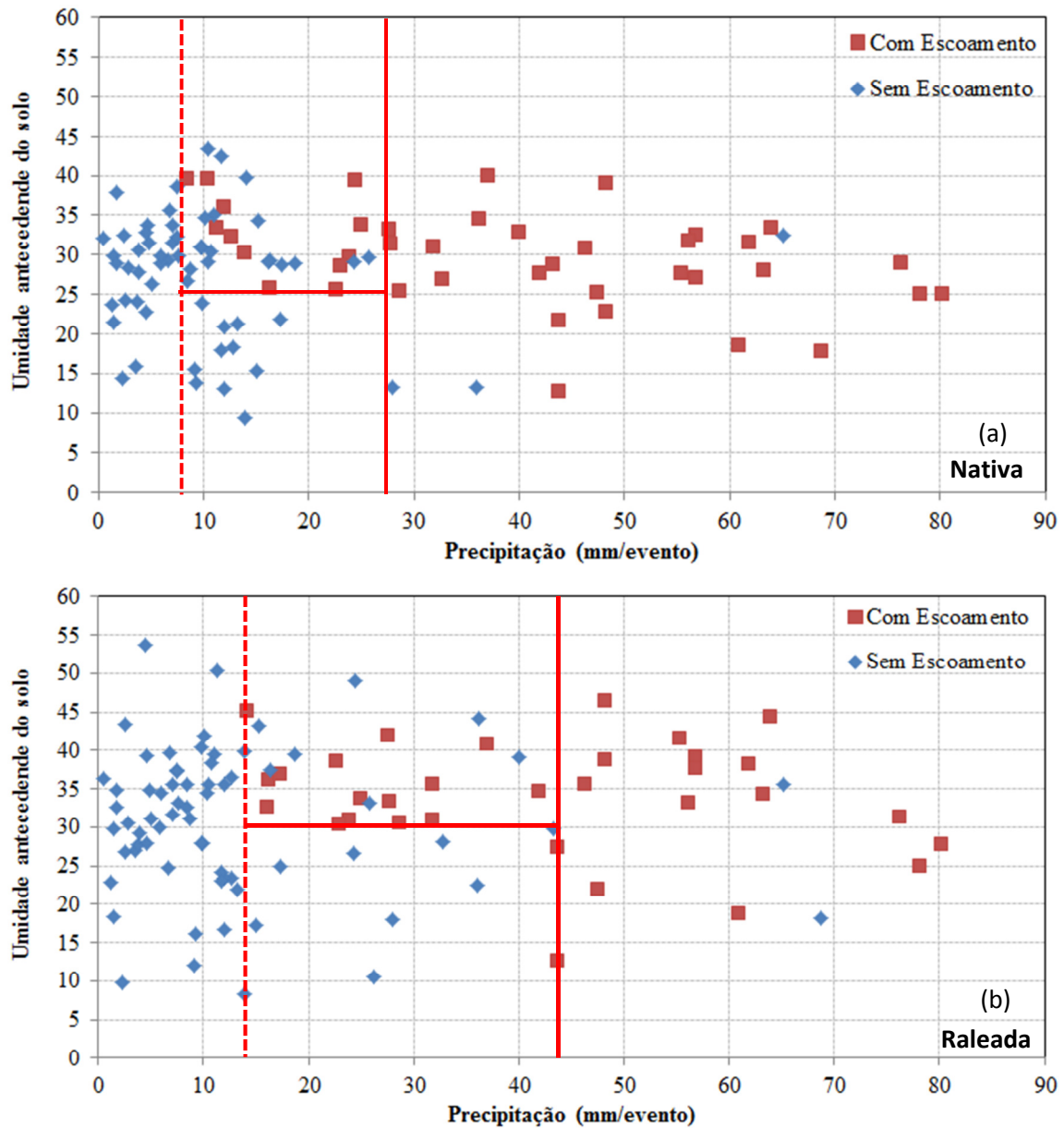
A grande dispersão dos valores de escoamento versus precipitação pluviométrica nas microbacias nativa e raleada, como demonstrado na Figura 8 para valores na escala de evento a evento, mostra que a lâmina escoada não apresenta boa relação com o total precipitado e que sofre a influência de outros fatores no processo chuva-deflúvio, por exemplo, as condições de umidade antecedente e a alta variabilidade da intensidade da chuva (CASTILLO et al., 2003). Autores como Alencar et al. (2006) e Onda et al. (2007) também verificaram que, com base apenas na precipitação total, não é possível prever o escoamento superficial.

Figura 8 – Relação entre lâmina escoada e total precipitado na escala de evento para as microbacias: (a) vegetação nativa e (b) vegetação raleada



A interdependência entre os fatores precipitação, umidade antecedente e escoamento superficial nas duas microbacias experimentais expressaram relações diferenciadas. Em condições de cobertura vegetal inalterada (Figura 9a) representativa da floresta Caatinga, o limiar da lâmina precipitada para gerar escoamento superficial é de 8,5 mm e uma precipitação maior que 27 mm, independente da umidade, sempre haverá escoamento, exceção para os casos especiais. Outro fator importante nestes processos é a umidade antecedente do solo. Em condições de vegetação natural se o solo apresentar umidade igual ou inferior a 25% as lâminas precipitadas entre 8,5 e 27 mm não geram escoamento superficial. Ocorrendo por fim, uma faixa entre precipitações de 8,5 e 27 mm e com umidade antecedente do solo superior a 25% que não se define a geração de escoamento, sendo a ocorrência ou não de escoamento nessa faixa para a microbacia nativa influenciada por outras variáveis hidrológicas.

Figura 9 – Relação entre precipitação e umidade antecedente do solo para as microbacias: (a) nativa e (b) raleada



Para a microbacia com vegetação raleada, os valores de precipitação pluviométrica para ocorrência ou não de escoamento são influenciados pelo manejo aplicado (Figura 9b). Nessa microbacia, precipitações maiores que 43,5 mm, independente da umidade, sempre haverá escoamento, exceção para o caso especial de dois eventos. Já para precipitações menores 14 mm, independente de umidade, não haverá início de geração de escoamento. Sendo, portanto, a faixa entre 14 e 43,5 mm em que a ocorrência ou não de escoamento é incerta. No entanto, nessa faixa também é importante os processos de umidade antecedente do solo, pois nessa faixa de intervalo de precipitação, quando o solo apresenta

umidades menores que 30% não há ocorrência de escoamento. Sendo, portanto, para a microbacia com vegetação raleada não se define a geração ou não de escoamento para uma umidade antecedente do solo acima de 30% e precipitações entre 14 e 43,5 mm.

Percebe-se, portanto, um deslocamento no limiar dos valores de precipitação para geração ou não de escoamento entre as microbacias com cobertura vegetal inalterada e raleada. Assim, uma suposta precipitação de 10 mm independente da umidade é capaz de gerar escoamento na microbacia com cobertura vegetal natural e não gerar na microbacia com vegetação raleada. Já uma chuva de 30 mm independente da umidade gera escoamento na vegetação nativa, mas não é capaz de gerar na vegetação raleada. Tal fato do deslocamento desse limiar para ocorrência ou não de escoamento ser provavelmente influenciado pelos manejos aplicados, assim o maior desenvolvimento do extrato herbáceo em decorrência da maior penetração de luz (Figura 2b) com o raleamento do extrato arbóreo resulta em um impedimento ao fluxo de massa do escoamento superficial com consequente aumento da umidade do solo e requerimento de uma maior lâmina precipitada para gerar escoamento. Figueiredo (2011), em estudo na Bacia Experimental de Aiuaba (BEA) numa área de 7,7 km² no semiárido brasileiro, constatou que eventos de precipitação superiores a 47,5 mm, independente da umidade antecedente, sempre geraram escoamento. No entanto, para precipitações menores, esse autor não conseguiu estabelecer uma relação unívoca entre a ocorrência do escoamento e umidade antecedente do solo.

Tratando isoladamente dos casos especiais, os três para a microbacia nativa e os dois para a microbacia raleada, referem-se aos eventos dos dias 27 de janeiro de 2010 e 19 de janeiro de 2012 para a microbacia nativa, bem como, 21 de janeiro de 2011 e 21 de janeiro de 2012 para as duas microbacias. Nota-se que esses eventos não foram capazes de gerar escoamento na microbacia raleada e não foi capaz de gerar escoamento na microbacia nativa. Isso provavelmente, deve-se ao fato de que esses eventos ocorreram logo no início da estação chuvosa dos seus respectivos anos, onde em todo o mês de janeiro de 2010 o total pluviométrico precipitado foi de 86,7 mm, sendo que para, até 21 de janeiro de 2011 perfaziam um total precipitado anterior de 44,8 mm e 21 de janeiro de 2012 perfaziam um total precipitado anterior de 36,3 mm. Portanto, esses eventos, mesmo com um total precipitado elevado e com umidade antecedente, a característica dos solos (presença de argila 2:1) e rachaduras no início da estação chuvosa, pode ter influenciado para a não ocorrência de escoamento, pois, as primeiras precipitações pluviométricas da estação chuvosa são empregadas para elevar a umidade do solo e eliminar as rachaduras, e só então os eventos seguintes começam a gerar o processo de escoamento superficial. A ausência de escoamento

no início da estação chuvosa em regiões semiáridas também foi registrada por Mugabe et al. (2007), estudando as respostas hidrológicas de duas microbacias hidrográficas no semiárido do Zimbabwe.

O efeito da distribuição temporal da precipitação pluviométrica sobre o início do escoamento foi analisado a partir da determinação das intensidades específicas para as durações de 5, 30 e 60 minutos (Figuras 10 e 11). Em precipitações menores que 10 mm para microbacia com vegetação inalterada independente da intensidade específica não há ocorrência de escoamento, já para microbacia com vegetação raleada não há ocorrência de escoamento para precipitações menores que 13 mm, independente da intensidade específica. Já a geração de escoamento ocorre toda vez que o total precipitado excede 27 mm para microbacia com vegetação nativa (Figura 10) e 40,5 mm para microbacia com vegetação raleada (Figura 11), com alguns eventos tratados como exceções quanto à geração de escoamento em ambas as microbacias, eventos esses que são, em sua totalidade, os primeiros eventos das estações chuvosas.

Autores como Torres et al. (2011) e Ran et al. (2012) estudaram as correlações entre os valores do escoamento e da característica da precipitação pluviométrica, mas não definiram valores de precipitação e intensidade para que ocorra ou não a geração de escoamento, como definido por Figueiredo (2011), que estudou o efeito da distribuição temporal da precipitação sobre o início do escoamento para bacia experimental de Aiuaba, e concluiu que a intensidade I60, foi aquela que mais separou eficientemente os eventos com e sem escoamento, intensidade bem próxima do tempo de concentração para esta bacia (65 min), o autor ainda observou que houve escoamento toda vez que a precipitação excedeu 47,50 mm independente da intensidade, entretanto eventos com precipitações menores não são bem definidos quanto a geração ou não de escoamento. Para condições de parcela, os limiares para a ocorrência de chuvas geradoras de escoamento foram estabelecidas em 10 a 15 mm h⁻¹ para intensidades máxima de 30 min em Murcia (MARTÍNEZ-MENA et al., 2001) e 4,2 mm h⁻¹ para intensidades máxima de 10 min para a mesma região (CAMMERAAT, 2002). Já para a região de Tabernas (Almeria) o limiar foi definido como 5,6 mm h⁻¹ a 5 min de intervalo (CANTÓN et al., 2001).

Figura 10 – Relação entre precipitação e intensidades específicas na microbacia com vegetação nativa

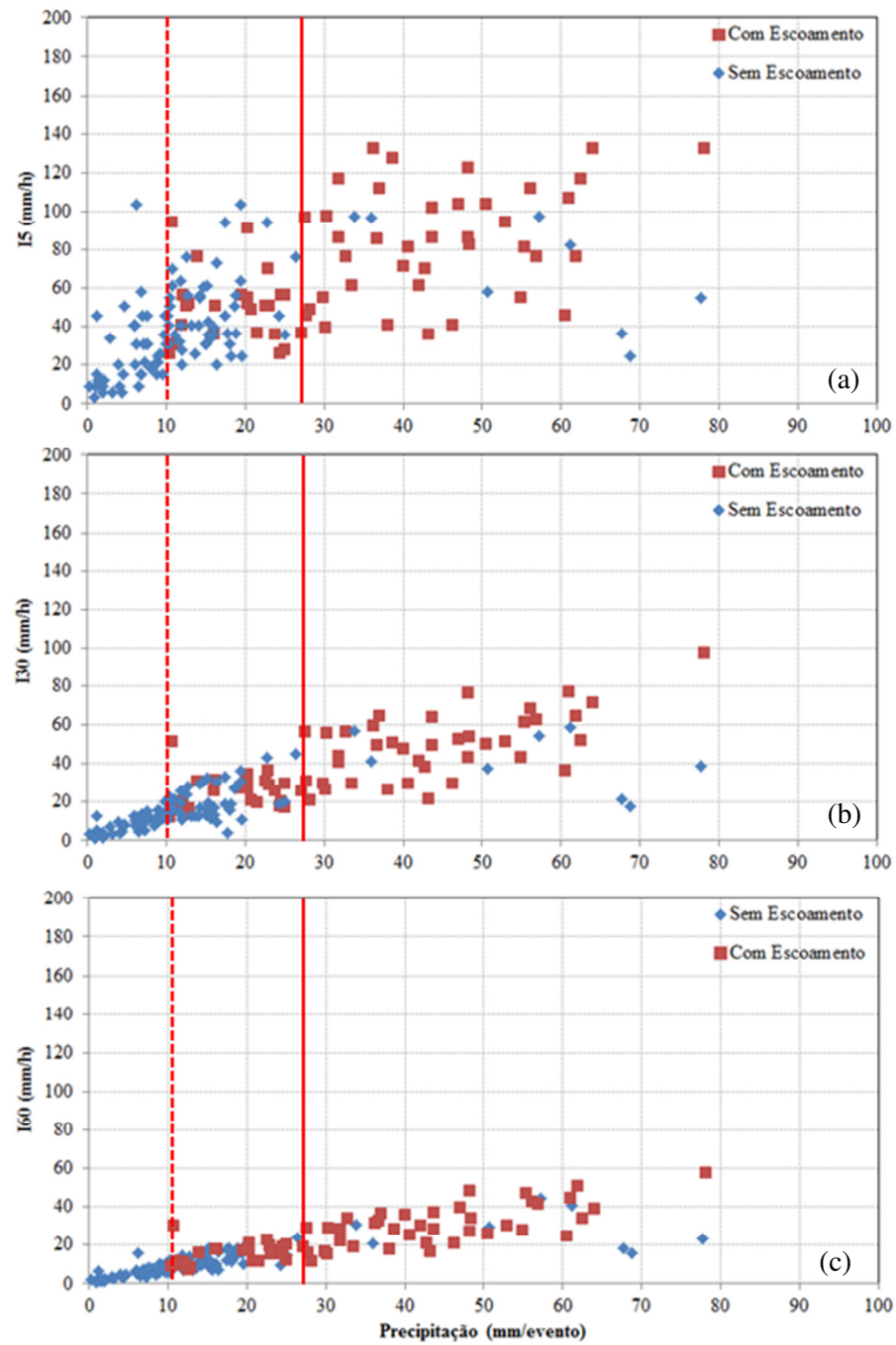
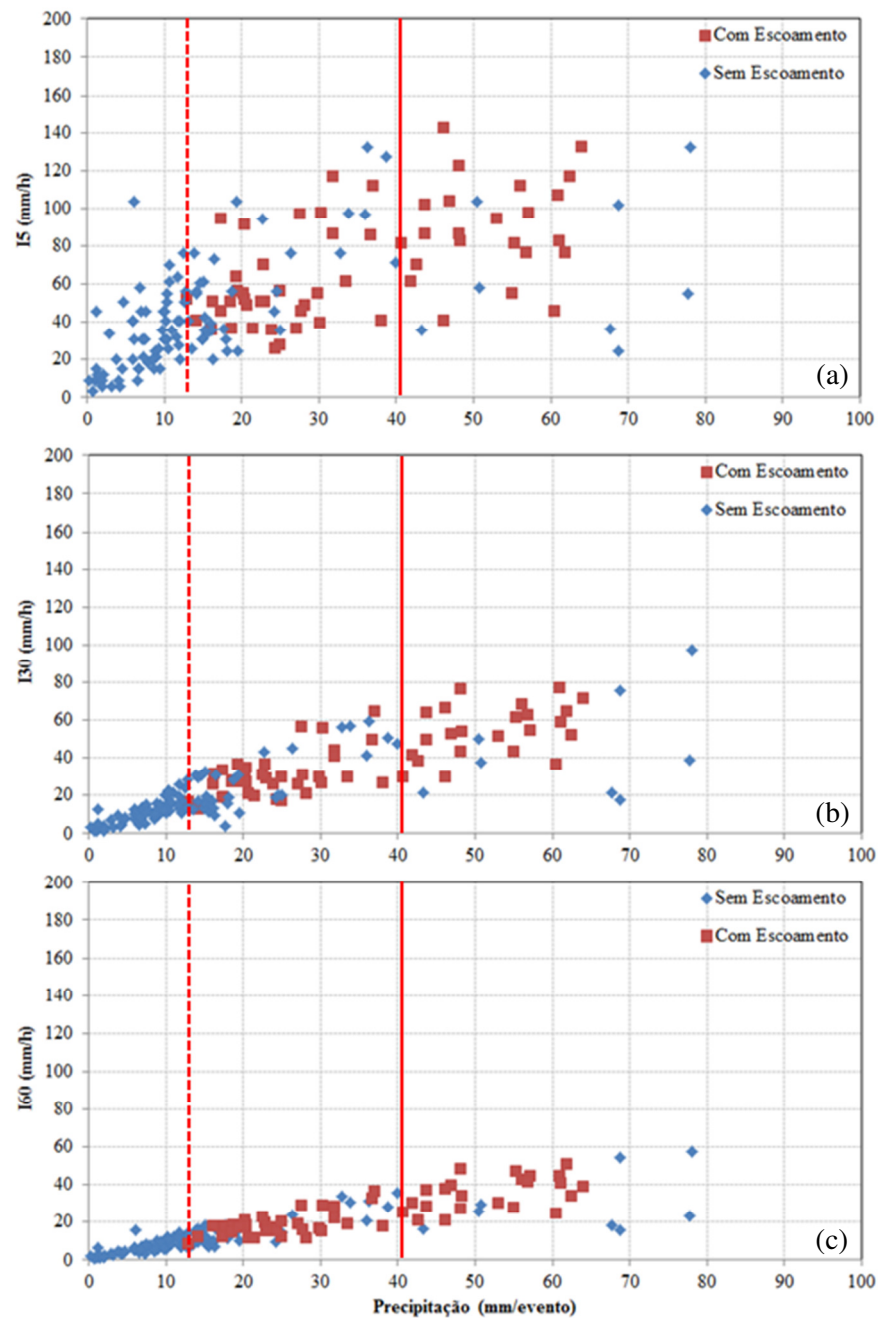


Figura 11 – Relação entre precipitação e intensidades específicas na microbacia com vegetação raleada



4 CONCLUSÕES

O surgimento do extrato herbáceo em decorrência do raleamento da vegetação gerou uma redução do escoamento e menores picos de vazões. Tal resposta hidrológica

aponta que o manejo é adequado para produção de pastagem e retenção de umidade no solo, o que promove a conservação dos recursos naturais;

A aplicação da vegetação para produção de pastagem, na microbacia do manejo do raleamento, influenciou nas respostas hidrológicas, refletindo na redução do número de eventos geradores de escoamento, no total escoado e nos picos de vazões, comparando com as respostas hidrológicas da microbacia com vegetação nativa;

O manejo aplicado também influenciou nos valores das variáveis, umidade antecedente do solo e intensidades de precipitação, para que ocorresse ou não escoamento superficial.

REFERÊNCIAS

AGRITEMPO - Sistema de monitoramento agrometeorológico. **Dados meteorológicos - Iguatu (INMET), dados históricos**. Disponível em: <http://www.agritempo.gov.br/agroclima/sumario>. Acesso em: 16 de maio de 2011.

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

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.

ANDRADE, L. A. et al. Análise de cobertura de duas fitofisionomias de Caatinga, com diferentes históricos de uso, no município de São João do Cariri, estado da Paraíba. **Cerne**, v. 11, n. 3, p. 256-262, 2005.

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, 2009.

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

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.

CASERMEIRO, M. A.; MOLINA, J. A.; CARAVACA, M. T. D. L.; COSTA, J. H.; MASSANET, M. I. H.; MORENO, P. S. Influence of scrubs on runoff and sediment loss in soils of Mediterranean climate. **Catena**, v. 57, p. 91–107, 2004.

CASTILLO, V. M.; GÓMEZ-PLAZA, A.; MARTÍNEZ-MENA, M. The role of antecedent soil water content in the runoff response of semiarid catchments: a simulation approach. **Journal of Hydrology**, v. 284, p. 114–130, 2003.

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.

EMBRAPA – Centro Nacional de Pesquisas de Solo. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Rio de Janeiro. 2 ed., 2006, 306 p.

FIGUEIREDO, J. V. **Início da geração do escoamento superficial em uma bacia semiárida em Caatinga preservada**. 84 f. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola – Manejo e Conservação de Bacias Hidrográficas no Semiárido) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza – CE, 2011.

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.

GOMES, F. E. F.; PALÁCIO, H. A. Q.; ARAÚJO NETO, J. R.; BRASIL, P. P. Comparativo da umidade do solo de duas microbacias na caatinga, em relação ao manejo. In: Congresso Norte e Nordeste de Pesquisa e Inovação, Palmas, Tocantins. **Anais...** CONNEPI, Tocantins, 2012.

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.

MUÑOZ-ROBLES, C.; REID, N.; TIGHE, M.; BRIGGS, S. V.; WILSON, B. Soil hydrological and erosional responses in patches and inter-patches in vegetation states in semiarid Australia. **Geoderma**, v. 160, p. 524–534, 2011.

ONDA, Y.; KATO, H. TANAKA, Y.; TSUJIMURA, M.; DAVA, G.; OYUNBAATAR, D. Analysis of runoff generation and soil erosion processes by using environmental radionuclides in semiarid areas of Mongolia. **Journal of Hydrology**, v. 333, p. 124–132, 2007.

PALÁCIO, H. A. Q. **Avaliação emergética de microbacias hidrográficas do semiárido submetidas a diferentes manejos**. 150 f. 2011. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola – Manejo e Conservação de Bacias Hidrográficas no Semiárido) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza – CE, 2011.

RAN, Q.; SU, D.; LI, P.; HE, Z. Experimental study of the impact of rainfall characteristics on runoff generation and soil erosion. **Journal of Hydrology**, v. 424–425, p. 99–111, 2012.

RODRIGUES, J. O.; ANDRADE, E. A.; PALÁCIO, H. A. Q.; MENDONÇA, L. A. R.; SANTOS, J. C. N. Sediment loss in semiarid small watershed due to the land use(no prelo), **RevistaCiênciaAgronômica**, 2013.

SANDSTRÖM, K. Hydrochemical deciphering of streamflow generation in semi-arid east Africa. **Hydrological Processes**,v. 10, n. 5, p. 703–720, 1996.

THORNTHWAITE, C. W. An approach toward a rational classification of climate. **Geogr.Rev.**, v. 38, p. 55-94, 1948.

TORRES, I. B. T.; AMATYA, D. M.; SUN, G.; CALLAHAN, T. J. Seasonal rainfall–runoff relationships in a lowland forested watershed in the southeastern USA.**Hydrological Processes**.v. 25, p. 2032–2045, 2011.

WAINWRIGHT, J., PARSONS, A. J., ABRAHAMMS, A. D. Plot-scale studies of vegetation, overland flowand erosion interactions: case studies fromArizona and NewMexico. **Hydrological Processes**,v. 14, p. 2921–2943. 2000.

CAPÍTULO 2

OTIMIZAÇÃO DO NÚMERO DE CURVA (CN-SCS) PARA DIFERENTES MANEJOS NA REGIÃO SEMIÁRIDA, CEARÁ, BRASIL

José Ribeiro de Araújo Neto¹, Helba Araújo de Queiroz Palácio², Eunice Maia de Andrade³,
Júlio César Neves dos Santos⁴, Everton Alves Rodriguez Pinheiro⁵

RESUMO

Objetivou-se com o presente estudo calibrar e validar o número de curva (CN) para diferentes manejos da vegetação caatinga no semiárido brasileiro. O trabalho foi desenvolvido em três microbacias experimentais localizadas na região Centro Sul do Ceará, Brasil. Os dados de precipitação e escoamento foram medidos no período de 2008 a 2011 por uma estação hidrometeorológica localizada no exutório das microbacias. Na primeira microbacia (B1), a cobertura vegetal foi mantida inalterada enquanto que na segunda (B2) foi aplicado o manejo de raleamento para produção de pastagem e na terceira (B3) aplicou-se o manejo de corte/queima e plantação da gramínea (*Andropogongayanus*, Kunt) para produção de pasto. A calibração do CN foi realizada empregando-se o critério do máximo coeficiente de Nash e Sutcliffe. Os resultados mostraram que o manejo da vegetação influencia na produção de escoamento nas microbacias refletindo nos valores de CN. Os CN gerados podem ser usados para estimativa do escoamento superficial em condições similares de manejo da caatinga no semiárido brasileiro e encontraram-se próximos a valores tabelados de manejos similares obtidos para condições de uso e cobertura do solo de outros países. Tanto na calibração como validação os modelos apresentaram bons coeficientes de Nash e Sutcliffe superiores a 0,6, bem como, índices de confiança de bom a muito bom.

Palavras-chave: Escoamento superficial. Modelagem hidrológica. Microbacias hidrográficas.

¹ Mestrando em Engenharia Agrícola no Departamento de Engenharia Agrícola, CCA/UFC. Av. Mister Hull, S/N, Caixa Postal 12.168, Campus do Pici, CEP 60455-970, Fortaleza, CE, Fone: (085) 3366.9762. E-mail: junior.bg@bol.com.br

² Doutora em Engenharia Agrícola, Professora do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará-IFCE, Campus Iguatu. E-mail: helbaraujo23@yahoo.com.br

³ Engenheira Agrônoma, Ph. D., Professora do Departamento de Engenharia Agrícola, CCA/UFC. E-mail: eandrade@ufc.br

⁴ Doutorando em Engenharia Agrícola no Departamento de Engenharia Agrícola, CCA/UFC. E-mail: julioesnds@yahoo.com.br

⁵ Mestrando em Engenharia Agrícola no Departamento de Engenharia Agrícola, CCA/UFC. E-mail: evertonvest@yahoo.com.br

CHAPTER 2

OPTIMIZATION OF THE CUVER NUMBER (CN-SCS) FOR DIFFERENT LAND MANEGEMENTS IN A SEMARID REGION, CEARÁ, BRASIL

ABSTRACT

This study was carried out to calibrate and validate the CN-SCS method for different land managements of the Caatinga vegetation in the Brazilian semiarid. The study was conducted in three experimental micro-catchments *in* the southern central region of Ceará State, Brazil. Rainfall and streamflow records were collected at a station locates at the catchment outlet from 2009 to 2011. The first small watershed (B1), is representative of caatinga, a type of scrubby forest; the second one (B2) was a thinning applied to pasture production and the third one (B3) was managed with cutting/burning and planting grass (*Andropogongayanus*, Kunt) to forage productivity. The CN calibration was done using the Nash-Sutcliffe coefficient. The results presenteded that the management of vegetation influences the runoff generation in watersheds reflecting the CN values. The CN calibrated can be used for the estimation of the surface runoff in management conditions similar to those in this study. The validation values were close to those which were recorded in similar managements in other countries. Both, the calibration and validation runoff model presented good Nash-Sutcliffe coefficients over 0,6.

Keywords: Runoff. Hydrologic modeling. Watershed.

1 INTRODUÇÃO

Os modelos hidrológicos tem se tornado ferramentas de planejamento e decisão, além das clássicas funções de avaliações hidrológicas e, como tal, devem ser estruturados de forma simples para permitir sua utilização por diversos usuários. A estimativa do escoamento superficial é essencial para a avaliação do potencial de rendimento de água em uma bacia hidrográfica, bem como, no planejamento de medidas de conservação do solo e água, redução do assoreamento e riscos de inundações a jusante (MUÑOZ-ROBLES et al., 2011). Embora muitos modelos hidrológicos estejam disponíveis para a estimativa do escoamento gerado de uma chuva, a maioria dos modelos é limitado, seja pela sua entrada de dados intensiva ou por requerimentos de processos de calibração (CHOW et al., 1988).

Um método simples e largamente utilizado em bacias hidrográficas no mundo é método do Número de Curva (CN) desenvolvido na década de 1950 pelo Serviço de Conservação dos Solos (SCS-USDA), atualmente Serviço de Conservação dos Recursos Naturais (NRCS) (HAWKINS, 1993; JACOBS; SRINIVASAN, 2005; TEDELA et al., 2005; BANASIK; WOODWARD, 2010; CAO et al., 2011). O método do SCS baseia-se no conceito de que a lâmina de escoamento superficial produzida em um dado evento é uma função da altura total da lâmina precipitada e das abstrações iniciais, que representa as perdas que ocorrem, principalmente, devido à infiltração, à interceptação vegetal e à retenção em depressões do terreno (TYAGI et al., 2008).

Os valores de CN são obtidos para cada uso e cobertura do solo em tabela padrão do SCS. As tabelas foram desenvolvidas para as condições de uso e cobertura do solo dos EUA, em conjunto com quatro grupos de solos classificados de acordo com a taxa de infiltração, textura e estrutura. (NRCS, 2007; LIMA et al., 2007).

Para alguns usos da terra e grupo de solo o valor CN não está disponível nos manuais e assim deve ser estimado. Desta forma, emerge a importância do desenvolvimento de pesquisas que sejam capazes de estimar o número da CN mediante diferentes cenários de uso e ocupação do solo para diferentes regiões. Já que, quando se trata da cobertura vegetal das bacias hidrográficas, sabe-se que este fator sofre várias modificações tanto naturais como antrópicas, e essa dinâmica produz alterações nas respostas hidrológicas (KANG et al., 2001; CASERMEIRO et al., 2004; BARTLEY et al., 2006; GARCIA-RUIZ et al., 2008).

Embora, o método de CN já seja bastante usado em todo o mundo, somente nas últimas décadas é que passou a ser empregado com uma maior frequência no Brasil (MELLO et al., 2003; ALVES et al., 2011). Alguns trabalhos têm buscado determinar o valor CN para algumas bacias hidrográficas localizadas no semiárido nordestino como Figueiredo (2011) e Almeida (2011), no entanto, pesquisas relacionadas ao modelo CN-SCS direcionadas aos diferentes manejos da vegetação caatinga na região semiárida brasileira ainda são escassas. Em outras regiões como na China, alguns pesquisadores também determinaram novos valores de CN para cada tipo de uso da terra, porque eles acreditavam que os valores de CN dos EUA não poderiam ser exportados para outros países (ZHANG et al., 2003; JIN et al., 2003; ZHANG et al., 2004; GAO et al., 2006; WANG; HUANG, 2008)

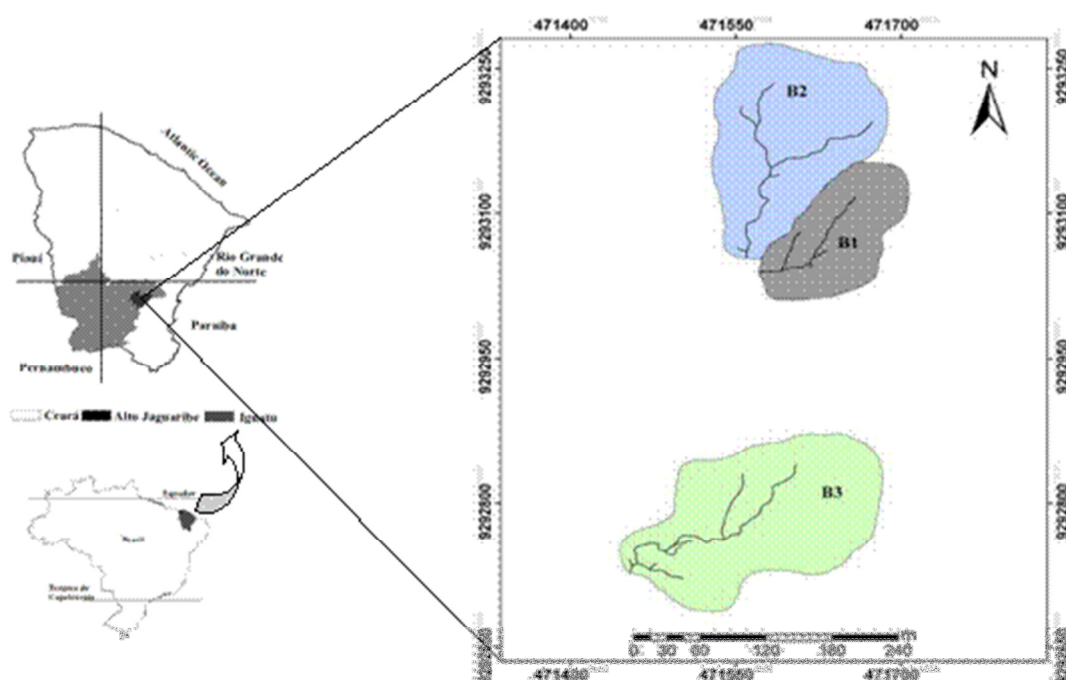
Nesse contexto, para uma aplicação mais próxima da realidade do modelo CN-SCS na previsão do escoamento em regiões semiáridas, este estudo tem como objetivo a calibração e validação do parâmetro número de curva para diferentes manejos da vegetação caatinga em pequenas bacias rurais no semiárido brasileiro.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Área de Estudo

A área de estudo é composta por três microbacias experimentais, localizadas no município de Iguatu, região Centro Sul do estado do Ceará, Brasil. Fazem parte da grande bacia hidrográfica do rio Jaguaribe, mas precisamente na sub-bacia do Alto Jaguaribe entre as coordenadas 6°23'42'' a 6°23'47'' S e 39°15'24'' a 39°15'29'' W (Figura 1). As microbacias experimentais estão inseridas na área de domínio do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará – IFCE e foram instaladas pela parceria entre a Universidade Federal do Ceará –UFC e o IFCE.

Figura 1 – Localização das microbacias experimentais no Estado do Ceará



O clima da região segundo a classificação de Koppen é do tipo BSw'h', clima semiárido. A temperatura média sempre superior a 18 °C no mês mais frio e precipitações pluviométricas máximas de outono. A média histórica da precipitação anual para o município de Iguatu entre os anos de 1974/2008 é de 970 ± 316 mm, sendo a precipitação pluviométrica na região concentrada principalmente nos meses de janeiro a maio, com 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. A região é caracterizada também por altas taxas evaporativas, com medida em tanque classe “A” chegando a uma média de $2.943 \text{ mm ano}^{-1}$ estando às médias mensais com maiores valores durante os sete meses de menor precipitação como citado por Santos et al. (2011).

As características morfométricas das microbacias experimentais estudadas podem ser verificadas na Tabela 1. As três microbacias monitoradas fazem parte do bioma Caatinga, apresentam escoamento efêmero e foram monitoradas durante as estações chuvosas dos anos de 2008 e 2011. O solo nas três microbacias em estudo é classificado como Vertissolo Ebânico Carbonático Típico, classificados de acordo com a EMBRAPA (2006).

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

Características	Unid.	Microbacias		
		B1	B2	B3
Manejo da vegetação		Caatinga nativa	Caatinga raleada	Queima com pastagem
Área da bacia	ha	2,06	1,15	2,80
Perímetro	m	594,50	478,35	696,75
Comprimento do talvegue	m	183,87	120,54	187,90
Comp. do curso principal	m	252,11	147,18	238,20
Comprimento da bacia	m	204,20	188,17	253,90
Declividade da bacia	%	10,59	8,72	5,57
Fator de forma	-	0,49	0,32	0,43
Coefficiente de compacidade	-	1,16	1,25	1,17
Densidade de drenagem	m ha ⁻¹	192,59	153,80	146,29
Tempo de concentração	h	0,06	0,05	0,07
Sinuosidade do curso principal	-	2,06	1,20	2,8

Quanto aos tratamentos aplicados a microbacia B1 foi mantida inalterada com cobertura vegetal natural durante o período de estudo, sem intervenção humana (Figura 2a), representando condições naturais de pequenas bacias rurais do semiárido brasileiro. A microbacia designada de B2 recebeu o manejo de raleamento em (Figura 2b), prática ainda pouco empregada por pequenos agricultores do semiárido brasileiro para produção de pastagem. Já a microbacia B3 foi submetida ao tratamento da corte/queima com plantação de pastagem (*Andropogongayanus*, Kunt) (Figura 2c), sendo a prática da queimada a mais utilizada pelos agricultores da região na remoção da vegetação. Ambos os tratamentos do raleamento e da queima foram aplicados com propósito de verificar a influência da prática de desmatamento na caatinga sobre as repostas hidrológicas em pequenas bacias rurais no semiárido brasileiro.

Figura 2 – Detalhes da vegetação nas microbacias experimentais: (a) B1 caatinga nativa; (b) B2 caatinga raleada e (c) B3 corte, queima e plantação da gramínea



2.2 Monitoramento Hidrológico

O monitoramento hidrológico das microbacias experimentais foi realizado a partir de estações automáticas equipadas com pluviógrafos (registro a cada 5 minutos) (Figura 3a), situadas a montante de uma calha Parshall (Figura 3b), responsável pela medição do deflúvio superficial. Para medição do nível da água foram instalados linígrafo automáticos, a partir das elevações de nível de água ou cotas registradas no sensor, que foram coletadas continuamente em intervalos de 5 minutos, converteu-se altura da água em vazão mediante equação específica de cada calha (equação 1).

Figura 3 –(a) Modelo do pluviógrafo e (b) calha Parshall instalados na microbacia experimental monitorada



$$Q = 3,72 W \cdot 0,0086 W^{0,026} \cdot Hm^{1,393} \cdot W^{0,026} \quad (1)$$

Em que:

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

W - representa a largura do estrangulamento (cm) para cada calha;

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

2.3 Calibração e Validação

O método Número de Curva do Soil Conservation Service (CN-SCS), utilizado na estimativa do escoamento superficial, engloba informações relativas à precipitação e ao componente solo-vegetação, considerando o tipo, o uso, a umidade inicial e a condição hidrológica do solo (NRCS, 2007). O método SCS foi fundamentado na análise de um amplo número de chuvas, sendo que a parte da precipitação que gera o escoamento superficial é dado pela equação 2.

$$P_e = \frac{(P - 0,2S)^2}{P + 0,8S} \quad (2)$$

Em que:

Pe - precipitação efetiva ou escoamento superficial, mm;

P - precipitação total, mm;

S - capacidade máxima de infiltração, mm.

Esta equação é válida para $P > I_a$, caso contrário, $P_e = 0$. Através de diversas pesquisas em pequenas bacias experimentais, uma relação empírica foi desenvolvida para as abstrações iniciais, na qual se estabeleceu que essas representam 20% da capacidade máxima de infiltração da água no solo ($0,2S$) (SCS, 1972).

Na aplicação do modelo CN-SCS a capacidade máxima de infiltração é obtida pela equação 3 com o uso do número de curva (CN). O CN varia de 1 a 100, normalmente, para as condições de campo o CN, situa-se entre 35 e 98, sendo o limite inferior para condições de solo com alta taxa de infiltração e com pouco escoamento, já o limite superior é para condições de solo de baixa taxa de infiltração e alto escoamento superficial.

$$S = \left(\frac{25400}{CN} \right) - 254 \quad (3)$$

Em que:

CN - é o parâmetro número da curva

Existem atualmente muitas tabelas que apresentam os valores de CN-II (condições de média umidade antecedente do solo) para várias superfícies de solos agrícolas e

urbanos, de acordo com seu grupo de solo, tipo de vegetação e área impermeabilizada e condições hidrológicas da superfície (SCS, 1972; TUCCI, 1993; CHOW et al., 1988; PRUSKI et al., 2004)

No método CN-SCS o número da curva pode ser determinado para quatro grupos de solos (A, B, C e D), classificados de acordo com a capacidade de produção de escoamento superficial. O risco de ocorrência de escoamento superficial aumenta no sentido de A para D, enquanto a capacidade de infiltração ocorre de modo inverso. Os limites da taxa de infiltração para grupo de solo definido pelo SCS-USDA são alvo de muitos estudos. De acordo com NRCS (2007) solos com uma camada impermeável de água existente a uma profundidade entre 50 a 100 cm e condutividade hidráulica saturada $< 3,6 \text{ mm.h}^{-1}$ fazem parte do grupo de solo D. Pesquisadores como Pruskiet al. (2004) afirmam que solos com taxa de infiltração $< 3 \text{ mm.h}^{-1}$ caracterizam como grupo de solos D. Sendo assim, as três microbacias possuem o mesmo solo com condutividade hidráulica saturada inferior a $0,2 \text{ mm.h}^{-1}$ classificado como grupo de solos do tipo D.

Foram selecionados 36, 30, 13 eventos para as microbacias B1, B2 e B3, respectivamente, entre as estações chuvosas de 2008 e 2011. O critério utilizado para selecionar os eventos foram somente aqueles que apresentavam condições de umidade antecedente AMC II (médio) ou III (alto), ou seja, apenas eventos com o somatório das precipitações nos últimos 5 dias superiores a 36 mm.

O ajuste do CN na etapa de calibração foi realizado pelo ajustamento do seu valor, através do coeficiente de NES, por meio do software *Excel* com o uso da ferramenta *Solver*, adotando como critério a relação entre a precipitação efetiva calculada com a precipitação efetiva medida até que o coeficiente de Nash-Sutcliffe atingisse valor máximo para aquele grupo de dados da calibração, que foram metade dos eventos em cada microbacia para calibrar, sendo a outra metade usada para validação.

Tanto na calibração do parâmetro CN como na validação o critério utilizado foi o máximo coeficiente definido por Nash-Sutcliffe (1970) dado pela equação 4.

$$NSE = 1 - \left[\frac{\sum (Y_m - Y_c)^2}{\sum (Y_m - \bar{Y}_m)^2} \right] \quad (4)$$

Em que:

NS – coeficiente de Nash e Sutcliffe, $\{-\infty < NSE < 1\}$;

Y_m – valor medido;

Y_c – valor calculado;

$\overline{Y_m}$ - média dos valores medidos.

Este coeficiente pode variar de $-\infty$ até 1, sendo 1 um ajuste perfeito. O desempenho de um modelo é considerado adequado e bom se o valor de NSE superar 0,75, e é considerado aceitável se o valor de NSE fica entre 0,36 e 0,75. O NSE, além de traduzir a similaridade da variabilidade entre duas variáveis, é um indicador da similaridade de quantificação, o que é considerado bastante relevante na avaliação de confiança e eficiência na modelagem o qual, segundo Machado et al. (2003), é um dos mais importantes critérios estatísticos para avaliar a precisão de modelos hidrológicos. Os coeficientes de Nash-Sutcliffe foram definidos como NSE-Cal. para o grupo de eventos de calibração, sendo metade dos eventos de cada microbacia, e NSE-Val. para os eventos de validação. Para a validação do CN levou-se em consideração a umidade antecedente do solo.

Para se validar o CN calibrado também foram aplicados os seguintes índices estatísticos: coeficiente de correlação (R), o qual indica a dispersão dos dados em relação à média (precisão) e índice de Willmott (id) que indica o grau de exatidão do modelo, ou seja, de quanto os valores estimados se aproximam dos observados. Por último empregou-se o índice de confiança ou desempenho (c), o qual é o produto do coeficiente de correlação com o índice de Willmott ($c = R * id$), em que $c = 1$ significa confiança perfeita e $c = 0$ considerado péssimo (Tabela 2), conforme proposto por Camargo; Sentelha (1997).

Tabela 2 – Valores do coeficiente de desempenho conforme Camargo; Sentelhas (1997)

Valor de "c"	Desempenho
> 0,90	Ótimo
0,81 a 0,90	Muito Bom
0,71 a 0,80	Bom
0,51 a 0,70	Mediano
0,41 a 0,50	Sofrível
0,31 a 0,40	Mau
$\leq 0,30$	Péssimo

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Calibração

Para os eventos selecionados, com base nos dados de precipitação e precipitação efetiva, determinou-se o armazenamento (S) e calibrou-se o número de curva (CN) que podem ser verificados juntos com os valores de coeficiente de escoamento (C) na Tabela 3. O coeficiente de escoamento foi calculado como o valor médio dos eventos selecionados. Verificou-se uma correlação entre os valores de CN e C para as microbacias em estudo. Estudos realizados por Lima et al. (2007) apontaram essa relação, e, ainda mostraram uma equação empírica que relaciona o CN com o coeficiente de escoamento. Considerando as similaridades morfológicas e do tipo de solo entre as microbacias em estudo, bem como as características climatológicas por serem bacias circunvizinhas, os valores desses coeficientes já indicam a influência do manejo da vegetação na produção do escoamento.

Tabela 3 – Coeficiente de escoamento (C), armazenamento (S), número de curva calibrado (CN) e coeficiente de Nash e Sutcliffe de calibração para as microbacias em estudo

Microbacias	Manejo aplicado	C	S (mm)	CN	NSE-Cal.*
B1	Caatinga nativa	0,16	80,2	75,4	0,75
B2	Caatinga raleada	0,10	97,3	72,3	0,76
B3	Queima com pastagem	0,27	33,0	88,5	0,80

*NSE-Cal. = Coeficiente de Nash-Sutcliffe usado como critério para calibração do CN.

A microbacia B1 apresentou, para os anos hidrológicos em estudo, S de 80,2 mm e CN de 75,4 próximos aos valores observados por Figueiredo (2011) também para vegetação caatinga, no período de 2005 e 2010, que observou S de 80 mm e CN de 78. O método CN-SCS busca representar as perdas hídricas potenciais de uma bacia; quanto menor o valor do parâmetro CN, maior será o armazenamento inicial de uma bacia, reduzindo a possibilidade de escoamento (TYAGI et al., 2008). Nesse sentido, verifica-se que a microbacia B2 apresentou o maior S de 97,3 mm e o menor CN de 72,3, valores inversos foram verificados na microbacia B3 com S de 33 mm e maior CN de 88,5.

Os menores CN para a microbacia B2, 4,1% inferior ao da microbacia B1 com caatinga nativa, ocorre provavelmente, pelo fato do maior desenvolvimento da vegetação herbácea no manejo do raleamento da caatinga. Este maior desenvolvimento é decorrente da maior penetração de luz solar e consequente desenvolvimento da vegetação rasteira. Esse comportamento corrobora com resultados encontrados por Muñoz-Robles et al. (2011) onde observou que em áreas com maior cobertura herbácea no semiárido do sudeste da Austrália ocorreu um amplo controle do escoamento.

Em outras regiões semiáridas no mundo Kang et al. (2001) e Bartley et al. (2006) constataram também que, mesmo em áreas com cobertura vegetal e declividade semelhantes, dependendo do arranjo da cobertura vegetal, com maior ou menor presença de cobertura herbácea, essas podem apresentar respostas hidrológicas diferentes. Autores como Wainwright et al. (2000) e Casermeiro et al. (2004) afirmam que, em áreas coberta com vegetação a resposta geral tem sido a redução significativa de taxas de escoamento, no entanto, as maiores diferenças nas taxas de escoamento está relacionada não somente com o total cobertura da vegetação, mas também como resultado de diferenças na fisionomia das plantas e da estrutura, que provoca diferentes valores de interceptação e escoamento pelos troncos das árvores.

Já a prática da remoção da vegetação pelo corte/queima na microbacia B3 aumenta significativamente o valor do CN (17,4% a mais em relação à microbacia B1 com caatinga nativa), pela ausência da cobertura do solo o que proporciona um maior escoamento. Kang et al. (2001) na China, indicaram que a enxurrada na região do país, decorrente das chuvas verão (intensidade alta), em áreas sob cultivo e cobertura vegetal foi significativamente menor que a de áreas de solo descoberto (sem cultura vegetal ou mesmo resíduos de culturas). Portanto, deixando evidente o decréscimo do escoamento superficial com o aumento da cobertura vegetal. Este resultado observado na microbacia B3 demonstra que a presença de cobertura vegetal é um fator preponderante sobre a redução do escoamento, corroborando com resultados de Garcia-Ruiz et al. (2008), que verificaram a importância da vegetação sobre o deflúvio em microbacia preservada.

Os resultados do CN calibrado neste estudo evidenciam a importância do arranjo das espécies vegetais na resposta hidrológica de microbacias. O raleamento, com o consequente surgimento das espécies herbáceas em uma maior densidade resultou em um aumento na infiltração da água no solo e uma redução das perdas de água por escoamento superficial. Tais resultados expressa o importante papel que a cobertura vegetal pode desempenhar no controle das perdas de água, principalmente quando se considera a

irregularidade e a baixa precipitação pluvial da região semiárida do Nordeste do Brasil, (ALBUQUERQUE et al., 2001). Resultados encontrados por Santos et al. (2007) avaliando as perdas de água em diferentes coberturas superficiais também no semiárido do Nordeste, Estado da Paraíba, observaram que na área com caatinga nativa a retenção de água foi 5 vezes maior do que as áreas expostas.

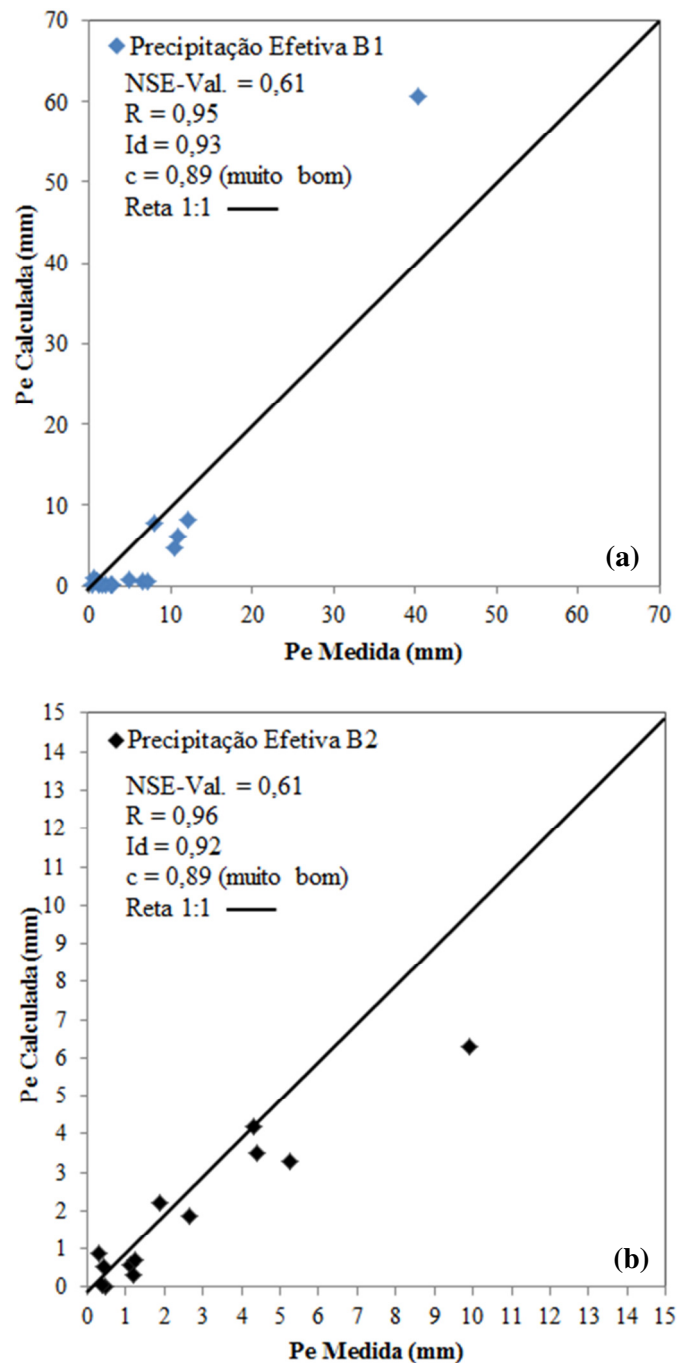
Novos valores de CN também foram determinados por alguns pesquisadores na China considerando diversos tipos de uso da terra. Wang; Huang (2008) obteve o valor CN para o milho (*Panicum miliaceum* L.), alfafa (*Medicago sativa* L.) e sorgo (*Sorghum bicolor* (Linn.) Moench), usando o escoamento medido para calcular os valores de CN. Estudos semelhantes também foram realizados em outras bacias hidrográficas (JIN et al., 2003; ZHANG et al., 2004; GAO et al., 2006). Já Zhang et al. (2003) estabeleceram uma nova abordagem para obter valores de CN a partir de um evento chuvoso em particular e para as chuvas dos últimos cinco dias, utilizando um método estatístico na bacia Anjiagou da província de Gansu. Esses autores obtiveram melhor desempenho do modelo CN-SCS com os novos valores de CN. Os resultados desses estudos indicaram que o valor CN padrão no modelo CN-SCS é uma superestimativa para alguns tipos de uso do solo e uma subestimativa para os outros.

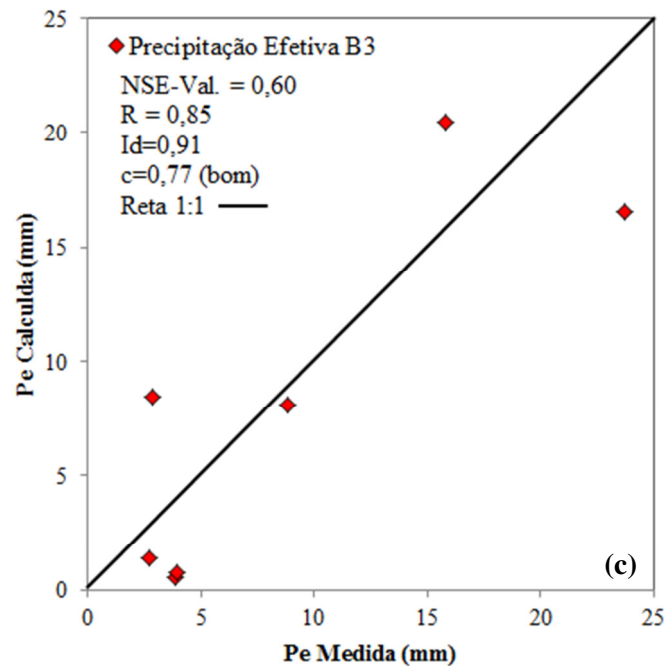
3.2 Validação

A Figura 4 apresenta a relação entre as precipitações efetivas medidas e as estimadas com o uso do CN calibrado para os três manejos, considerando as condições de umidade antecedente (AMC), visto que, as predições de escoamento são muito sensíveis às condições de umidade anteriores nos sistemas de bacias hidrográficas (PATIL et al., 2008). Quando a simulação apresentar acuracidade, os pares de pontos (medidos e estimados) apresentam-se em torno da reta 1:1, a qual conecta os valores computados iguais aos observados, ou seja, a igualdade perfeita. Pelos índices aplicados, a precipitação efetiva estimada e medida apresenta boa correlação em todos os manejos, com coeficientes de correlação (r) superiores a 0,80 e índice de Willmott (id) maior que 0,90, indicando um bom desempenho ($c = 0,77$) para a microbacia B3 e muito bom ($c=0,89$) para as microbacias B1 e B2. Os coeficientes de Nash e Sutcliffe para validação (NSE-Val.) nas três microbacias foram

maiores que 0,60 (Figura 4), mostrando que para o número de eventos em estudo o CN pôde ser calibrado e validado com boa precisão. Resultados semelhantes forma observados por Almeida (2011) na calibração e validação do CN em duas encostas também no semiárido brasileiro.

Figura 4 –Valores de escoamento superficial medido e estimado atribuindo o CN calibrado para: (a) microbacia B1; (b) microbacia B2 e (c) microbacia B3





Independente do manejo aplicado, os valores de CN calibrados e validados para as microbacias estudadas apresentaram valores altos superiores a 70 (Tabela 3), podendo ser atribuído em parte aos eventos selecionados apresentarem condições de umidade antecedente AMC II (médio) ou III (alto), bem como também, à característica sedimentar da geologia onde a microbacias está inserida e ao tipo de solo, classificado como D segundo as classes do modelo CN-SCS em decorrência da baixa condutividade hidráulica saturada inferior de $0,2 \text{ mm.h}^{-1}$. Araújo e Piedra (2007) mencionaram que os processos envolvidos na formação do escoamento superficial estão mais relacionados à geologia e ao solo do que às atributos climáticos, observando na região sedimentar da bacia de Jaruco em Cuba um maior CN em relação à bacia comparada de Aiuaba no semiárido do Ceará.

A fim de averiguar se os valores de CN, calibrados e validados para os diferentes manejos na caatinga apresentados na Tabela 3, representam bem as condições reais, efetuou-se uma comparação entre valores obtidos neste estudo e os das tabelas existentes na literatura. A Tabela 4 apresenta valores de CN tabelados que relaciona o estado de cobertura do solo, as condições hidrológicas e o tipo de solo, sob a condição de umidade média (AMC II), para as condições próximas as encontradas nas microbacias manejadas. O grupo de solo presente nas três microbacias é o D, de acordo com a classificação usada no método CN-SCS.

Tabela 4 – Número de curva (CN) para bacias agrícolas nas condições de umidade antecedente normal (AMC II)

Cobertura do Solo	Condições de Superfície	Tipo de Solo			
		A	B	C	D
Florestas	Normais	36	60	70	(76)*
	Muito esparsas, baixa transpiração	56	75	86	91
	Esparsas	46	68	78	84
	Densas, alta transpiração	26	52	62	69
Campos Permanentes	Normais	30	58	71	(78)*
	Esparsa, baixa transpiração	45	66	77	83
	Densas, alta transpiração	25	55	70	77
Pastagens	Condições pobres	68	79	86	(89)*
	Condições ótimas	39	61	74	80

Fonte: SCS (1972)

* Entre parênteses o valor de CN tabelado para manejos considerados similares aos aplicados nesse estudo.

Verifica-se na Tabela supracitada que o valor tabelado de CN para florestas normais é 76, próximo o valor do CN calibrado e validado de 75,4 (Tabela 3) para microbacia B1 com cobertura vegetal caatinga nativa. Já o valor de CN para a microbacia B2 com caatinga raleada foi comparado a uma cobertura com campos permanentes em condições de superfície normais, devido a vegetação típica da microbacia ter sido retirada entorno de 60% com o manejo do raleamento, causando assim um maior desenvolvimento do extrato herbáceo formado devido a maior penetração da radiação solar. O valor de CN calibrado e validado para caatinga raleada foi de 72,3 valor próximo ao CN de 78 para campos permanentes normais, sendo que nas condições reais de caatinga raleada a cobertura herbácea provocou uma redução no valor do parâmetro CN em comparação com a caatinga nativa. Já para a microbacia B3, pode-se comparar o valor de CN calibrado e validado de 88,5 ao valor de CN de 89 para pastagens em condições pobres, pois, o tratamento da corte/queima com plantação de pastagem estava em estagio inicial nos anos em estudo.

Portanto, os valores de CN para diferentes manejos da caatinga na região semiárida do Ceará na Tabela 3 estão coerentes com os valores similares observados na literatura na Tabela 4, representando o nível de confiança na utilização dos valores de CN calibrados e validados em condições reais e locais de campo nos manejos estudados para predição do escoamento superficial em microbacias rurais com manejos similares.

4 CONCLUSÕES

1. Para os eventos hidrológicos selecionados nos anos em estudo foi possível a calibração e validação do parâmetro CN em diferentes manejos da vegetação caatinga.
2. Os CN gerados podem ser usados para estimativa do escoamento superficial em condições similares de manejo da caatinga no semiárido brasileiro e encontraram-se próximos a valores tabelados de manejos similares obtidos para condições de uso e cobertura do solo de outros países.
3. Pelos índices aplicados, os CN calibrados e validados apresentaram alta confiabilidade com coeficientes de Nash-Sutcliffe superiores a 0,6 indicando um bom desempenho, enquanto o índice de confiança ($c > 0,75$) classifica a etapa de validação de bom a muito bom.
4. Os menores valores de CN = 72,3 para a microbacia com caatinga raleada, próximo ao CN = 75,4 para microbacia nativa, sugere um manejo adequado para a produção de pastagem no semiárido, uma vez que produz pastagem e reduz as perdas de água por escoamento superficial. A prática de corte/queima com pastagem, tornou o solo mais exposto, proporcionando maiores escoamentos expressos no valor de CN, que foi de 88,5.

5 AGRADECIMENTOS

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq pelo apoio financeiro à pesquisa e a CAPES. Ao projeto de pesquisa PELD - Pesquisas Ecológicas de Longa Duração, Sítio 16 - Capital Natural da Caatinga – CE. A equipe do Laboratório de Análises de Água, Solo e Tecidos Vegetais - LABAS, IFCE- Campus Iguatu.

REFERÊNCIAS

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

ALMEIDA, C. L. **Impacto da recuperação de áreas degradadas sobre as repostas hidrológicas e sedimentológicas em ambiente semiárido**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE, Brasil. 2011.

ALVES, D. B., SAUSEN, T. M., LACRUZ, M. S. P. Modelagem dinâmica do escoamento superficial na área urbana de Santa Maria – RS. **Anais... XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR**, Curitiba, PR, INPE. p.5671-5678, 2011.

ARAÚJO, J. C.; PIEDRA, J. I. G. Comparative hydrology: analysis of a semiarid and a humid tropical watershed. **Hydrological Processes**, v. 23, p. 1169–1178, 2009.

BANASIK, K., WOODWARD, D. **Empirical determination of runoff curve number for a small agricultural watershed in Poland**. 2nd Joint Federal Interagency Conference, Las Vegas, NV, June 27 - July 1, 2010.

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

CAMARGO, A. P.; SENTELHAS, P. C. Avaliação de desempenho de diferentes métodos de estimativa de evapotranspiração potencial no Estado de São Paulo, Brasil. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, SeteLagoas, v. 5, n. 1, p. 89-97, 1997.

CAO, H., VERVOORT, R. W., DABNEY, S. M. Variation in curve numbers derived from plot runoff data for New South Wales (Australia). **Hydrological Processes**, v. 25, p. 3774-3789, 2011.

CASERMEIRO, M. A.; MOLINA, J. A.; CARAVACA, M. T. D. L.; COSTA, J. H.; MASSANET, M. I. H.; MORENO, P. S. Influence of scrubs on runoff and sediment loss in soils of Mediterranean climate. **Catena**, v. 57, p. 91–107, 2004.

CHOW, V. T.; MAIDMENT, D. R.; MAYS, L. W. **Applied Hydrology**. McGRAWHILL International Editions: Civil Engineering Series. 572 p. 1998.

FIGUEIREDO, J. V. **Início da geração do escoamento superficial em uma bacia semiárida em Caatinga preservada**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE, Brasil, 2011.

GAO, Y.; ZHU, B.; MIAO, C. Y.; ZHANG, J. Z. Application of SCS model to estimate the volume of rainfall runoff in sloping field of purple soil. **Chin. Agr.Sci. Bull.**, v. 22, n. 11, p. 396–400, 2006.

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.

- HAWKINS, R. H. Asymptotic determination of curve numbers from data. Journal of Irrigation and Drainage Division, **American Society of Civil Engineers**, v. 119, n. 2, p. 334-345, 1993.
- JACOBS, J. H., SRINIVASAN, R. Effects of curve number modification on runoff estimation using WSR-88D rainfall data in Texas watersheds. **Journal of Soil and Water Conservation**, v. 60, n. 5, p. 274-279, 2005.
- JIN, H.; SUN, X. H.; LI, Y. B. Application of SCS model in Lanhe watersheds. **J. Taiyuan Univ. Technol.**, v. 34, n. 6, p. 735-736, 2003.
- 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 of China. **Hydrological Processes**, v. 15, p. 977-988, 2001.
- LIMA, H. M.; VARGAS, H. CARVALHO, J.; GONÇALVES, M.; CAETANO, H. Comportamento hidrológico de bacias hidrográficas: integração de métodos e aplicação a um estudo de caso. **REM: R. Esc. Minas, Ouro Preto**, v. 60, n. 3, p. 525-536, 2007.
- MACHADO, R. E.; VETTORAZZI, C. A.; CRUCIANI, D. E. Simulação de escoamento em uma microbacia hidrográfica utilizando técnicas de modelagem e geoprocessamento. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 8, n. 1, p. 147-155, 2003.
- MELLO, C. R., LIMA, J. M., SILVA, A. M. S., LOPES, D. Abstração inicial da precipitação em microbacia hidrográfica com escoamento efêmero. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e ambiental**, v. 7, n. 3, p. 494-500, 2003.
- MUÑOZ-ROBLES, C.; REID, N.; TIGHE, M.; BRIGGS, S. V.; WILSON, B. Soil hydrological and erosional responses in patches and inter-patches in vegetation states in semiarid Australia. **Geoderma**, v. 160, p. 524-534, 2011.
- NATURAL RESOURCES CONSERVATION SERVICE (NRCS): **National Engineering Handbook**, Part 630 Hydrology, U.S. Department of Agriculture, Chapt. 7, Hydrologic Soil Groups, 2007.
- PATIL, J.P.; SARANGI, A.; SINGHA, A.K.; AHMADB, T. Evaluation of modified CN methods for watershed runoff estimation using a GIS-based interface. **Biosystems Engineering**, v. 100, p. 137-146, 2008.
- PRUSKI, F. F.; BRANDÃO, V. S.; SILVA, D. D. **Escoamento Superficial**. 2. ed. Viçosa: UFV, 2004. 87 p.
- SANTOS, J. C. N.; PALÁCIO, H. A. Q.; ANDRADE, E. M.; MEIRELES, A. C. M.; ARAÚJO NETO, J. R. Runoff and soil and nutrient losses in semiarid uncultivated fields. **Revista Ciência Agrônômica**, v. 42, n. 3, p. 813-820, 2011.
- SANTOS, C. A. G. VAJAPEYAM, R. M. S.; SRINIVASAN, S. Análise das perdas de água e solo em diferentes coberturas superficiais no semiárido da Paraíba. **Revista OKARA: Geografia em debate**, João Pessoa, v. 1, n. 1, p. 1-152, 2007.

TEDELA, N., MCCUTCHEON, S., RASMUSSEN, T., TOLLNER, W. **Evaluation and Improvements of the Curve Number Method of Hydrological Analysis on Selected Forested Watersheds of Georgia**. Report submitted to Georgia Water Resources Institute. Available at <http://water.usgs.gov/wrri/07grants/progress/2007GA143B.pdf>. Accessed 23 January 2012. 2008.

TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: ciência e aplicação**. Porto Alegre: Editora da Universidade, ABRH: EDUSP, 1993. 944p.

TYAGI, J. V.; MISHRA, S. K.; SINGH, R.; SINGH, V. P. SCS-CN based time-distributed sediment yield model. **Journal of Hydrology**, v. 352, p. 388–403, 2008.

WAINWRIGHT, J., PARSONS, A. J., ABRAHAM, A. D. Plot-scale studies of vegetation, overland flow and erosion interactions: case studies from Arizona and New Mexico. **Hydrological Processes**, v. 14, p. 2921–2943, 2000.

WANG, Y.; HUANG, M. B. Optimizing parameters of SCS-CN method for application on the Loess Plateau. **Bull. Soil Water Conserv.**, v. 28, n.1, p. 54–58, 2008.

ZHANG, M. H.; WANG, X. Y.; QIN, F. L. Application of SCS model to estimate the quantity of rainfall runoff of small watershed in Shixia, Miyun County. **J. Capital Norm. Univ. (Nat. Sci. Ed.)**, v. 25 (S1), p. 155–158, 2004.

ZHANG, X. Y.; MENG, F.; DING, N. Application of SCS model to estimating the quantity of runoff of small watershed in semi-arid or arid region. **Res. Soil Water Conserv.**, v. 10, n. 4, p. 172–174, 2003.

CAPÍTULO 3

AVALIAÇÃO COMPARATIVA DO MODELO CN-NRCS PARA MICROBACIAS COM DIFERENTES MANEJOS EM REGIÃO SEMIÁRIDA

RESUMO

O modelo hidrológico Número de Curva do Serviço de Conservação do Solo dos EUA (CN-NRCS), atualmente Serviço de Conservação dos Recursos Naturais (NRCS), é amplamente utilizado para prever o escoamento direto em pequenas bacias hidrográficas em diferentes partes do globo, tendo no entanto, o seu desempenho pouco estudado em regiões semiáridas do Nordeste brasileiro. Assim, empregou-se este modelo para investigar a razão de abstração inicial (λ) em duas microbacias, uma coberta com vegetação caatinga nativa e outra com vegetação caatinga raleada, com o objetivo de calibrar e validar o número de curva (CN) para diferentes manejos da vegetação, através de análises de sensibilidade dos parâmetros e de confiabilidade do modelo CN-NRCS. Foram estudados 47 e 40 eventos chuva/deflúvio gerados nestas microbacias com área de 2,06 e 1,15 ha. O valor da razão de abstração inicial (λ) média avaliada foi de 0,15 para a microbacia com vegetação nativa e de 0,18 para a microbacia com vegetação raleada. Os CN calibrados e validados apresentaram valores de 75,3 e 72,8 respectivamente, considerando λ medido para cada microbacia. O modelo CN-NRCS apresentou maior sensibilidade às alterações nos valores do CN do que para alterações na razão λ . O modelo ainda apresentou baixa confiabilidade, em virtude da variação dos parâmetros e ainda influenciado pela sensibilidade dos parâmetros de entrada (CN e λ), bem como, das incertezas na variável de entrada precipitação.

Palavras-chave: Modelagem Hidrológica. Método CN-NRCS. Razão de Abstração Inicial. Confiabilidade. Semiárido.

CHAPTER 3

COMPARATIVE EVALUATION OF THE CN-NRCS MODEL FOR WATERSHEDS WITH DIFFERENT MANAGERMENTS IN SEMIARID REGION

ABSTRACT

The hydrologic model Curve Number of the Soil Conservation Service of the U.S. (NRCS-CN) currently Service Natural Resources Conservation (NRCS), is widely used to predict the direct runoff in small catchments in different parts of the globe, but having had its performance rarely studied in semiarid regions of the northeastern Brazil. Thus, we used this model to investigate the ratio of initial abstraction (λ) in two catchments, one covered with native vegetation and other one with Caatinga vegetation thinned in order to calibrate and validate the curve number (CN) for different managements of vegetation, through sensitivity analysis of parameters and reliability of the model CN-NRCS. We studied 47 and 40 rainfall-runoff events generated in these catchments with an area of 2.06 ha and 1.15, respectively. The average ratio of initial abstraction (λ) was 0.15 for the catchment with native vegetation and 0.18 for that with vegetation thinned. The CN calibrated and validated presented values of 75.3 and 72.8, respectively, considering measurements of λ for each catchment. The model CN-NRCS presented greater sensitivity to changes in the values of CN than to changes in the ratio λ . The model also presented low reliability due to the variation and the high sensitivity of the input parameters (CN and λ) as well as the uncertainties in the input variable precipitation.

Keywords: Hydrologic Modeling. Method NRCS-CN. Initial abstraction ratio. Reliability. Semiarid Environment.

1 INTRODUÇÃO

Os modelos hidrológicos se tornaram ferramentas de planejamento e decisão, além das clássicas funções de avaliações hidrológicas e, portanto, devem ser estruturados de forma simples para permitir sua utilização por diversos usuários (SINGH, 2002). A estimativa do escoamento superficial é essencial para a avaliação do potencial de rendimento de água em uma bacia hidrográfica, bem como no planejamento de medidas de conservação do solo e água para redução do assoreamento e riscos de inundações à jusante. Embora muitos modelos hidrológicos estejam disponíveis para a estimativa do escoamento gerado por uma chuva, a maioria dos modelos são limitados quer seja pela sua entrada de dados intensiva ou por requerimentos de processos de calibração (CHOW et al., 1988; SHI et al., 2009).

Dentre desses modelos hidrológicos, o método de Curva Número do Serviço de Conservação do Solo dos EUA CN-NRCS (1972) se destaca por ser simples, empírico, com pressupostos claramente definidos e, cujos dados de entrada requeridos são geralmente disponíveis, relacionando o escoamento superficial com o tipo, o uso e a cobertura do solo e a precipitação. Por isso, tem sido amplamente utilizado na estimativa de escoamento em bacias hidrográficas em todo o mundo, bem como em outras aplicações que incluem a produção de sedimentos e modelagem de umidade do solo (PONCE e HAWKINS, 1996; HAWKINS et al., 2002; MELLO et al., 2003; MISHRA e SINGH, 2004; MISHRA et al., 2006; BALTAS et al., 2007; LIU e LI, 2008; TYAGI et al., 2008; WANG e HUANG, 2008; SHI et al., 2009; SAHU et al., 2010; BO et al., 2011).

Este modelo tem como base a lei da conservação da massa, aqui exposta sob a forma do balanço hídrico de um evento de precipitação pluviométrica, $P = I_a + F + Q$, sendo P a precipitação pluviométrica total (mm), I_a a abstração inicial (mm), F a infiltração (mm) e Q o escoamento superficial (mm) do evento, e o princípio de que a razão entre o escoamento total (Q) e a precipitação após abstrações iniciais ($P - I_a$) é igual à razão entre a infiltração (F) e a retenção potenciais (S), ou seja $\frac{Q}{P - I_a} = \frac{F}{S}$. Deste modo, obtém-se a relação final $Q = \frac{(P - I_a)^2}{P - I_a + S}$.

Um dos princípios que rege este modelo é que as abstrações iniciais são função do potencial de armazenamento do solo, onde tradicionalmente, e de forma simplista, a razão entre as abstrações iniciais e o potencial de armazenamento é o valor constante de 0,2. Acredita-se que essa relação abstração inicial – potencial de armazenamento é um pressuposto que exige um refinamento mais detalhado (SHI et al., 2009). Alguns autores atestaram que

valores menores para esta constante modelam melhor o escoamento superficial (HAWKINS et al., 2002; MELLO et al., 2003; MISHRA e SINGH, 2004; BALTAS et al., 2007; SHI et al., 2009). Ponce e Hawkins (1996) ainda sugerem que a relação da abstração inicial pelo armazenamento em 0,20 deve ser interpretado como um parâmetro característico de cada bacia, assim como o parâmetro curva número (CN).

Além do conhecimento das hipóteses simplificadoras quando da utilização de um determinado modelo, o conhecimento de sua sensibilidade em relação aos parâmetros de entrada é, também, de fundamental importância. A análise de sensibilidade é uma avaliação das magnitudes relativas nas respostas do modelo em função de mudanças relativas nos valores dos parâmetros de entrada do mesmo (NEARING et al., 1990). Para o modelo CN-NRCS, esta análise permite a avaliação do efeito da variação dos parâmetros (λ e CN) nos valores estimados do escoamento superficial (BO et al., 2011).

Outra análise relevante na aplicação de um modelo é a confiabilidade da saída, que permite avaliar o nível de confiança das previsões de um modelo. A análise de confiança é uma ferramenta que permite, a partir do conhecimento da variabilidade existente nos valores dos parâmetros e das incertezas das variáveis de um modelo hidrológico por meio de suas distribuições de probabilidades, determinar o ajuste do modelo aos dados hidrológicos. De acordo com Chow et al. (1988), a confiabilidade dos resultados da análise de frequência depende de quão bem o modelo probabilístico assumido se aplica ao conjunto de dados hidrológicos estudados.

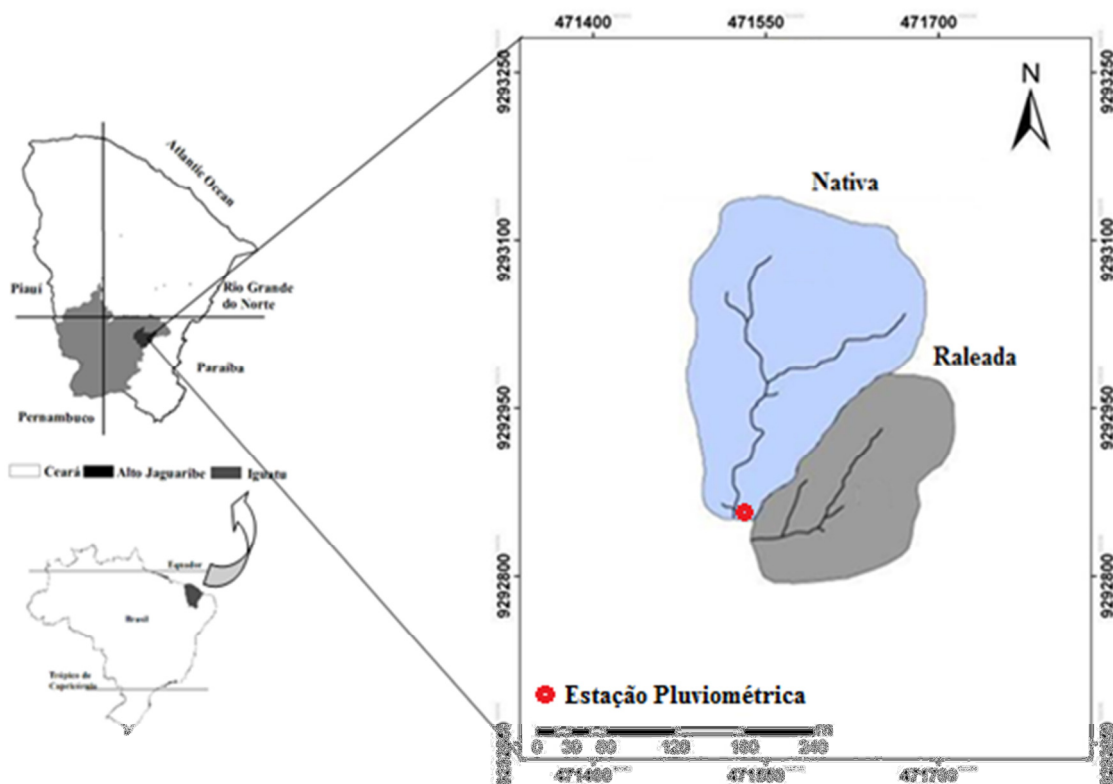
Nesse contexto os principais objetivos dessa pesquisa foram: (i) determinar a razão de abstração inicial (λ) para as microbacias estudadas; (ii) calibrar e validar o parâmetro número de curva (CN) considerando a razão λ recomendada pelo modelo (0,2); (iii) calibrar e validar o parâmetro número de curva (CN) considerando a razão λ média medida; (iv) analisar a sensibilidade do escoamento direto aos parâmetros CN e λ e (v) avaliar a confiabilidade do modelo.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Área de estudo

A área experimental localiza-se no município de Iguatu, Ceará, Brasil, pertencente ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE), Campus Iguatu (Figura 1).

Figura 1 – Mapas das microbacias experimentais no município de Iguatu, Ceará, Brasil



O clima da região é do tipo BSw'h' (Semiárido quente), de acordo com a classificação climática de Köppen, com temperatura média sempre superior a 18 °C no mês mais frio. O Índice de Aridez elaborado por Thornthwaite (1948) é de 0,44 classificando-se como semiárido. A evapotranspiração potencial média é de 1.988 mm ano⁻¹, a precipitação pluviométrica média histórica no município de Iguatu é de 867 ± 304 mm, com 85% concentrados no período de janeiro-maio e dos quais cerca de 30% são registrados no mês de março (AGRITEMPO, 2011), expressando a concentração das chuvas em cinco meses do ano.

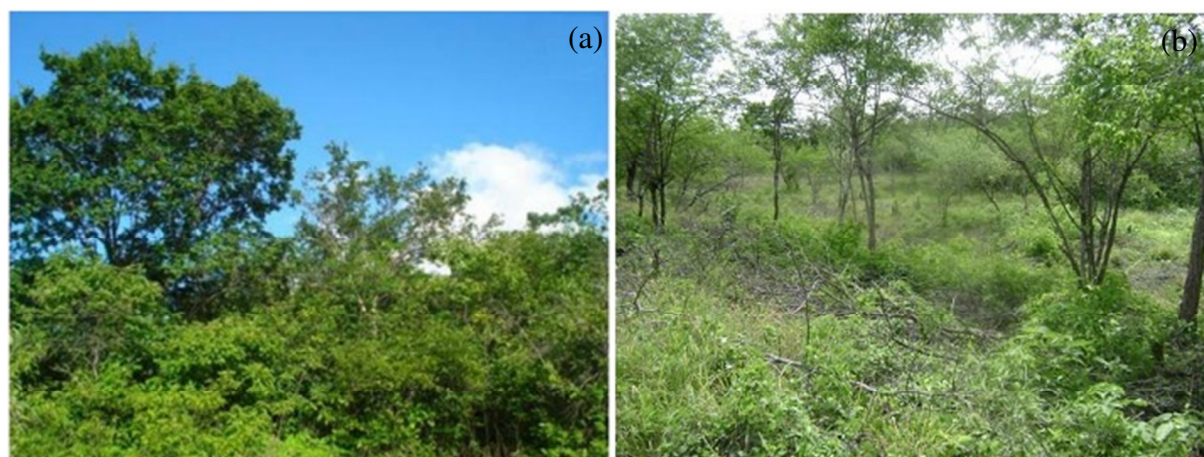
A composição da vegetação é tipicamente caatinga, com caráter variável, desde espécies de porte herbáceo a arbóreo-arbustivo, tipicamente caducifólio de caráter xerófilo com grande variedade de espécies espinhosas. O solo da área experimental é classificado como Vertissolo Ebânico Carbonático Típico de acordo com a classificação da Embrapa (2006).

Quanto aos tratamentos aplicados, a microbacia com vegetação nativa (Figura 2a) foi mantida inalterada com cobertura vegetal natural durante o período de estudo, sem intervenção humana, representando condições naturais de pequenas bacias rurais do semiárido brasileiro. A microbacia com vegetação raleada (Figura 2b) recebeu o manejo de raleamento da vegetação, prática ainda pouco empregada por pequenos agricultores do semiárido brasileiro para produção de pastagem. As características morfométricas da microbacia experimental estudada podem ser verificadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Características morfométricas das microbacias experimentais estudadas

Características	Unid.	Microbacias	
Manejo da vegetação		vegetação nativa	vegetação raleada
Área da bacia	ha	2,06	1,15
Perímetro	m	594,50	478,35
Comprimento do talvegue	m	183,87	120,54
Comprimento do curso principal	m	252,11	147,18
Comprimento da bacia	m	204,20	188,17
Declividade da bacia	%	10,59	8,72
Fator de forma	-	0,49	0,32
Coefficiente de compacidade	-	1,16	1,25
Densidade de drenagem	m ha ⁻¹	192,59	153,80
Tempo de concentração	h	0,06	0,05
Extensão média do escoamento	m	20,50	19,50
Sinuosidade do curso principal	-	2,06	1,20

Figura 2 – Detalhes da vegetação nas microbacias experimentais: (a) vegetação nativa em 2009 e (b) vegetação raleada em 2010



O estudo ocorreu durante as estações chuvosas dos anos de 2009, 2010, 2011 e 2012 as quais correspondem ao primeiro semestre de cada ano. O monitoramento hidrológico da microbacia experimental foi realizado a partir de uma estação automática em cada microbacia, com registro a cada cinco minutos, equipada com pluviógrafos e calha Parshall,

responsável pela medição do deflúvio superficial (Figura 3). Para medição do nível da água foram instalados linígrafos automáticos e a partir das elevações de nível de água ou das cotas registradas no sensor converteu-se a altura da água em vazão, mediante equação específica da calha.

Figura 3 – (a) Modelo do pluviógrafo e (b) calha Parshall instalados nas microbacias experimentais monitoradas em 19-03-2008



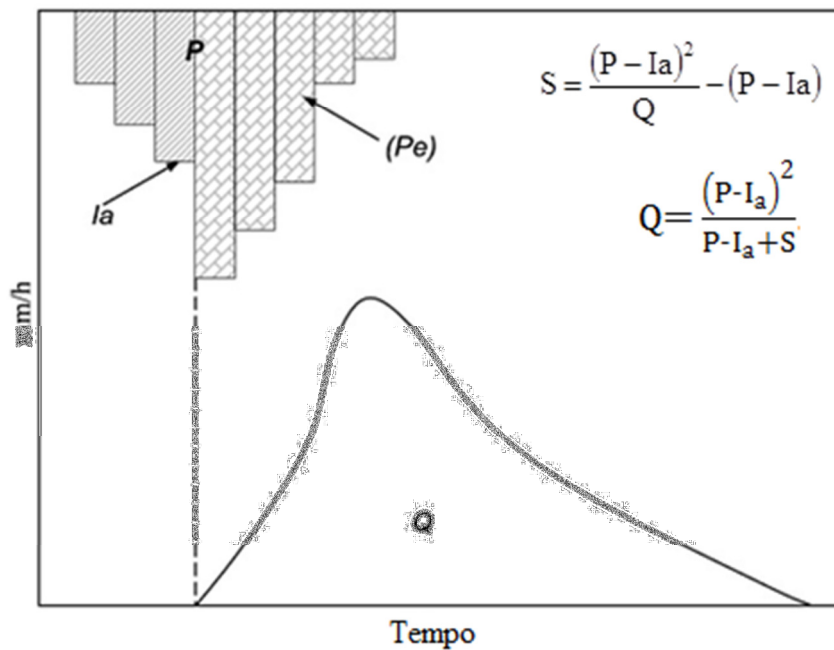
2.2 Cálculo da abstração inicial

Foi analisado um total de 82 eventos geradores de escoamento para determinação da razão λ , sendo 42 eventos na microbacia com vegetação nativa e 40 eventos na microbacia com vegetação raleada. Foram seleccionados somente os eventos que apresentavam condições de umidade antecedente AMC II (média) ou III (alta), ou seja, aqueles cujo somatório da precipitação pluviométrica nos últimos 5 dias foi superior a 36 mm. O solo da bacia foi classificado como do grupo hidrológico D (taxa de infiltração $< 1,27 \text{ mm h}^{-1}$) (CHOW et al., 1988).

O procedimento na determinação da relação de abstração inicial (λ) para cada evento foi obtido como ilustrado na Figura 4, dividindo o volume de escoamento direto total pela área da bacia para transformar em lâmina escoada ou precipitação efetiva (precipitação efetiva como adotada até então). Conhecida a precipitação pluviométrica efetiva e de posse dos registros de precipitação e vazão da calha Parshall, calculou-se a lâmina de abstração

inicial. Tal medida fundamentou-se no processo de que ao iniciar a pluviosidade, uma parte da água é abstraída até que seja iniciada a resposta no escoamento superficial (precipitação efetiva definida de forma diferente). Assim, a quantificação da lâmina abstraída (I_a) é toda água que precipita antes do primeiro registro na calha Parshall.

Figura 4 – Método de análise de cada evento (HAWKINS et al., 2002) adaptado



Em seguida foi realizada a determinação do potencial de armazenamento (S) da microbacia. Com os valores conhecidos de cada evento da vazão e precipitação efetiva (confuso, pq precipitação efetiva era igual ao escoamento superficial), o valor de “ S ” para cada evento foi obtido a partir da Eq. 1. De posse dos valores das abstrações iniciais (I_a) e do potencial de armazenamento (S), calculou-se a λ evento a evento. Após a obtenção da razão λ para cada evento, calculou-se o valor médio para a microbacia em estudo.

$$S = \frac{(P - I_a)^2}{Q} - (P - I_a) \quad (1)$$

2.3 Calibração e validação do CN

Para a calibração e a validação do parâmetro CN os eventos foram separados em dois blocos, respectivamente. Em um primeiro momento, foi calibrado e validado o parâmetro CN usando a razão λ recomendada pelo método CN-NRCS (1972). Em um segundo, a calibração e validação para o CN foi realizado com o uso da razão λ média medida para cada microbacia estudada. Tanto na calibração como na validação do CN o critério utilizado foi o coeficiente de performance definido por Nash-Sutcliffe (1970) dado pela Eq. 2.

$$NSE = 1 - \left[\frac{\sum (Y_m - Y_c)^2}{\sum (Y_m - \overline{Y_m})^2} \right] \quad (2)$$

Onde:

NSE – Coeficiente de Nash e Sutcliffe, $\{-\infty < NSE < 1\}$;

Y_m – valor medido;

Y_c – valor calculado;

$\overline{Y_m}$ - média dos valores medidos.

Este coeficiente pode variar de $-\infty$ até 1, sendo 1 um ajuste perfeito. O desempenho de um modelo é considerado adequado e bom se o valor de NSE superar 0,75, e é considerado aceitável se $0,35 < NSE < 0,75$. O NSE, além de traduzir a similaridade da variabilidade entre duas variáveis, é um indicador da similaridade de quantificação, o que o torna relevante na avaliação de confiança e eficiência na modelagem. Segundo Machado et al. (2003), o NSE é um dos mais importantes critérios estatísticos para avaliar a precisão de modelos hidrológicos.

Para se validar o CN calibrado também foram aplicados os seguintes índices estatísticos: coeficiente de correlação (R), o qual indica a dispersão dos dados em relação à média (precisão) e índice de Willmott (id) que indica o grau de exatidão do modelo, ou seja, de quanto os valores estimados se aproximam dos observados. Por último empregou-se o índice de confiança ou desempenho (c), o qual é o produto do coeficiente de correlação com o índice de Willmott ($c = R * id$), em que $c = 1$ significa confiança perfeita e $c = 0$ considerado péssimo conforme proposto por Camargo e Sentelhas (1997). Também foi aplicado percentagem da diagonal (PBIAS) que é utilizado para medir a tendência média dos dados simulados para ser maior ou menor do que os seus pares observados. O valor ideal de PBIAS

é zero, com valores positivos indicando subestimação e negativos indicando superestimação do modelo.

2.4 Confiabilidade do modelo CN-NRCS

A partir do conhecimento das incertezas dos parâmetros CN e λ e da variável de entrada, precipitação (P), efetuou-se uma análise de confiabilidade ao modelo CN-NRCS (1972), empregando-se o método de Monte Carlo. Assume-se que os dados seguem uma distribuição de probabilidade normal.

As análises de confiabilidade do Modelo CN-NRCS foram realizadas em eventos que atendiam às condições de umidade antecedente AMC II (média) ou III (alta), ou seja, aqueles cujo somatório da precipitação nos últimos 5 dias foi superior a 36 mm. Foram selecionados aleatoriamente para cada uma das microbacias. Para gerar a série sintética de precipitação (P) e do número de curva (CN) e da razão (λ) utilizou-se a Eq. 4:

$$X = \bar{X} + k\sigma_x \quad (4)$$

Onde:

X= valor encontrado por meio da simulação;

$\bar{X}$ = média da série do parâmetro ou variável medida;

k = valor normal padrão (fdp);

σ_x = desvio padrão do parâmetro ou variável medida;

O método de Monte Carlo é um método de amostragem artificial utilizado na solução de experimentos aleatórios onde se tem conhecimento das distribuições de probabilidade das variáveis envolvidas. A simulação por este método consiste das seguintes etapas:

- (i) Gerar valores aleatórios para os parâmetros e as variáveis de entradas (P, CN e λ) conforme a suas funções de distribuição;
- (ii) Repetir (i) n vezes até que a média e o desvio padrão da série sintética gerada seja igual ou próximo da série medida;

- (iii) Determinar a média sintética e o desvio padrão de P, CN e λ e calcular a variável de saída - precipitação efetiva (Pe) - para cada evento da série sintética gerada;
- (iv) Retirar os 2,5% maiores e menores valores da variável de saída (Pe);
- (v) estimar os limites, mínimo e máximo da variável de saída, precipitação efetiva (Pe), com 95% de confiança.

2.5 Sensibilidade dos parâmetros CN e λ

A análise de sensibilidade foi realizada para os parâmetros curva número (CN) e a razão de abstração λ com o intuito de verificar o efeito dos incrementos (positivos e negativos) destes parâmetros nos valores estimados dos escoamentos gerados, para isso utilizou-se a modelagem na microbacia com vegetação nativa. Com relação ao CN, aplicou-se incrementos de até 30% positivos e negativos com passo de 5%, visto que, para a característica dos solos do grupo hidrologico D, os valores de CN não se apresentam compatíveis com as características do solo quando inferiores a 60. Quanto à λ , foram aplicados incrementos positivos e negativos de até 100% do valor medido com o passo de 10%.

Para análise da sensibilidade calculou-se o índice de sensibilidade relativa (IS, adimensional) utilizando a Eq. 3 apresentada por McCuen e Snyder (1986):

$$IS = \frac{\frac{R_1 - R_2}{R_{12}}}{\frac{E_1 - E_2}{E_{12}}} \quad (3)$$

Em que:

R_1 = a resposta do modelo associada a E_1 ;

R_2 = a resposta do modelo associada a E_2 ;

R_{12} = a média entre R_1 e R_2 .

E_1 = o menor valor de entrada;

E_2 = o maior valor de entrada;

E_{12} = a média dos valores de entrada;

O IS (Eq. 3) representa a mudança normalizada gerada na saída do modelo para uma mudança normalizada na entrada dos dados (NEARING et al., 1990). Quanto mais distante de zero forem os índices obtidos, mais sensível é o modelo ao parâmetro de entrada, enquanto que os valores próximos a zero indicam que o modelo apresenta pouca sensibilidade ao parâmetro. Um sinal negativo no índice de sensibilidade indica que um aumento no valor do parâmetro promove uma diminuição na estimativa do modelo, enquanto um sinal positivo indica o oposto.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Relação da λ com base em análise de eventos de chuva-deflúvio

Os valores de λ na microbacia com caatinga nativa variaram entre 0,01 e 0,30 com média 0,15 e desvio padrão 0,08 o que produz um CV de 56% (Tabela 2). Já os valores de λ na microbacia com vegetação raleada apresentaram maior variação, sendo o mínimo 0,01 e o máximo 0,72, com média 0,18 e desvio padrão 0,19 o que produz um CV de 104% (Tabela 3). As Figuras 5a e 5b mostram, em ambas as microbacias, que a relação de (λ) não está relacionado com a precipitação pluviométrica como já verificado por autores em diferentes partes do globo (HAWKINS et al., 2002; BALTAS et al., 2007; SHI et al., 2009; BO et al., 2011; MELLO et al., 2003). Em geral, os resultados mostraram que a razão λ não é uma constante, mudando de evento para evento, e que a suposição de $\lambda = 0,20$ superestima as condições de estudo, uma vez que em mais de 60% das razões λ foram inferiores a 0,2, como recomendado pelo método CN-NRCS, em ambas as microbacias.

Tabela 2 – Eventos selecionados de chuva/deflúvio para as estações chuvas de 2009, 2010, 2011 e 2012 na microbacia com vegetação nativa

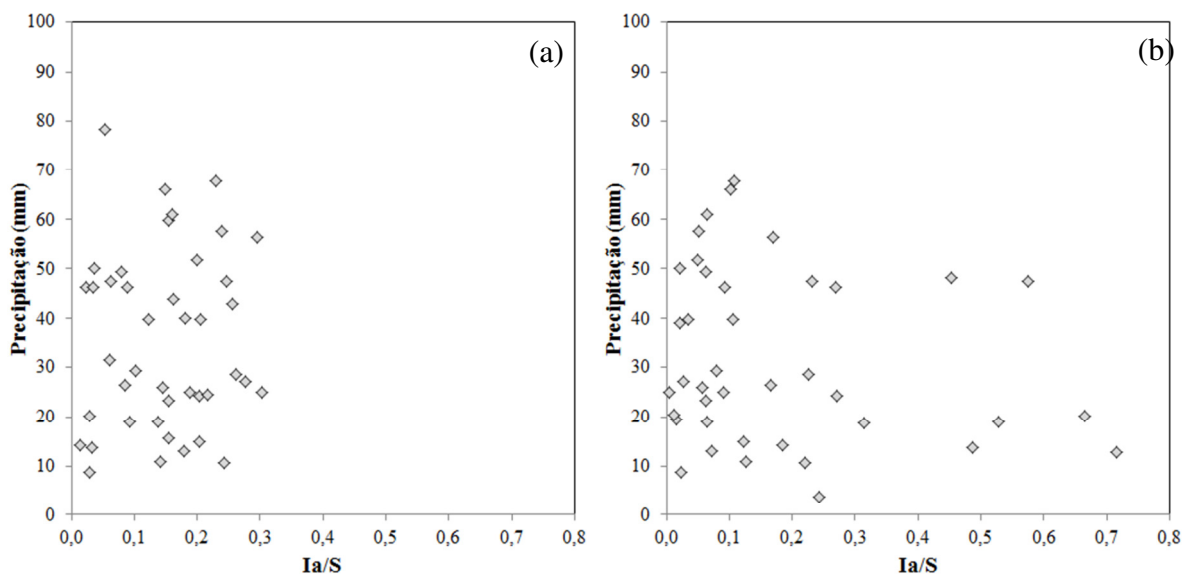
Nº	Eventos	P (mm)	Pe (mm)	Ia (mm)	S (mm)	Λ
22	11-abr-10	14,22	0,32	4,32	300,82	0,01
23	19-abr-10	46,23	7,97	4,32	178,52	0,02
18	13-mai-09	20,06	2,56	2,79	99,19	0,03
16	9-mai-09	8,63	0,56	2,03	71,14	0,03
9	20-abr-09	13,71	0,55	4,57	142,69	0,03
37	23-jan-12	46,25	5,07	8,48	243,33	0,03

10	13-abr-09	50,00	6,82	7,87	218,08	0,04
40	19-fev-12	78,13	37,62	3,816	72,48	0,05
25	30-jan-11	31,38	2,57	9,75	160,41	0,06
20	27-mar-10	47,50	0,18	37,08	586,78	0,06
6	15-abr-09	49,27	9,40	9,91	125,48	0,08
30	21-abr-11	26,29	1,04	13,14	153,51	0,09
24	24-jan-11	46,22	1,48	25,02	283,33	0,09
13	28-abr-09	19,05	2,82	5,08	55,24	0,09
14	30-abr-09	29,21	11,50	3,30	32,46	0,10
28	11-abr-11	39,86	1,93	20,78	169,82	0,12
4	27-fev-09	18,87	0,15	14,79	106,90	0,14
19	15-mai-09	10,92	1,04	4,57	32,40	0,14
5	3-mar-09	26,01	8,65	4,59	31,62	0,15
26	1-fev-11	66,14	22,72	11,45	76,97	0,15
11	24-abr-09	23,36	6,51	5,08	33,05	0,15
32	25-abr-11	59,78	13,86	15,26	98,53	0,15
1	3-fev-09	15,56	0,06	13,26	85,49	0,16
31	23-abr-11	61,06	13,42	16,54	103,22	0,16
42	21-fev-12	43,75	15,63	7,632	47,33	0,16
17	10-mai-09	12,91	1,87	4,83	26,86	0,18
45	27-mar-12	40,00	6,22	14,416	79,68	0,18
12	25-abr-09	24,89	4,94	7,87	41,60	0,19
33	30-abr-11	51,73	10,88	16,11	80,95	0,20
15	1-mai-09	14,98	1,10	7,87	38,80	0,20
21	29-mar-10	24,13	0,88	15,49	76,24	0,20
7	17-abr-09	39,87	12,56	9,14	44,44	0,21
46	29-mar-12	24,50	1,79	13,144	60,75	0,22
35	5-mai-11	67,84	34,49	9,33	40,76	0,23
29	19-abr-11	57,66	15,32	16,54	69,29	0,24
2	13-fev-09	10,71	0,11	8,67	35,79	0,24
3	18-fev-09	47,43	12,06	14,28	57,97	0,25
27	6-abr-11	42,82	1,90	27,56	107,62	0,26
8	19-abr-09	28,44	4,19	12,19	46,76	0,26
36	6-mai-11	27,14	10,54	5,94	21,45	0,28
34	3-mai-11	56,39	20,02	13,99	47,40	0,30
47	4-abr-12	25,00	2,33	13,568	44,68	0,30
Total		1487,88	315,60	466,38		
Média					105,47	0,15
Desvio Padrão					102,80	0,08

Tabela 3 – Eventos selecionados de chuva/deflúvio para as estações chuvas de 2009, 2010, 2011 e 2012 na microbacia com vegetaçãoaleada

Nº	Eventos	P (mm)	Pe (mm)	Ia (mm)	S (mm)	λ
40	4-abr-12	25,00	0,56	3,39	807,47	0,01
29	20-abr-11	20,35	0,81	3,82	322,03	0,01
27	16-abr-11	19,50	0,10	11,02	717,14	0,02
9	23-abr-09	50,00	4,40	7,87	361,19	0,02
24	28-fev-11	39,01	2,24	8,48	386,35	0,02
15	9-mai-09	8,63	0,48	2,03	84,10	0,02
36	6-mai-11	27,14	2,84	4,24	161,54	0,03
25	11-abr-11	39,86	0,96	17,38	504,69	0,03
32	30-abr-11	51,73	12,49	5,94	122,07	0,05
28	19-abr-11	57,66	13,39	7,21	139,64	0,05
4	3-mar-09	26,01	4,75	4,34	77,27	0,06
10	24-abr-09	23,36	4,42	4,06	64,94	0,06
5	15-abr-09	49,27	3,95	15,75	250,97	0,06
31	23-abr-11	61,06	15,04	8,48	131,18	0,06
3	27-fev-09	18,87	0,19	12,75	195,62	0,07
16	10-mai-09	12,91	1,21	4,06	55,82	0,07
13	30-abr-09	29,21	9,92	3,30	41,76	0,08
11	25-abr-09	24,89	4,32	5,84	64,94	0,09
37	23-jan-12	46,25	1,46	25,44	276,32	0,09
23	1-fev-11	66,14	10,52	17,808	173,77	0,10
6	17-abr-09	39,87	8,07	9,14	86,26	0,11
35	5-mai-11	67,84	23,49	9,33	87,21	0,11
14	1-mai-09	14,98	1,24	6,35	51,43	0,12
18	15-mai-09	10,92	0,38	6,35	50,39	0,13
30	21-abr-11	26,29	3,09	10,60	64,01	0,17
33	3-mai-11	56,39	23,46	8,48	49,92	0,17
21	11-abr-10	14,22	0,826	7,87	42,47	0,19
1	13-fev-09	10,71	0,13	8,42	38,22	0,22
7	19-abr-09	28,44	1,96	15,75	69,50	0,23
19	27-mar-10	47,50	0,634	37,08	160,64	0,23
38	20-fev-12	3,75	1,32	0,85	3,50	0,24
22	19-abr-10	46,23	4,897	23,11	85,99	0,27
20	29-mar-10	24,13	1,132	15,49	57,23	0,27
26	15-abr-11	18,66	0,17	15,69	49,85	0,31
39	24-fev-12	48,25	9,90	21,20	46,82	0,45
8	20-abr-09	13,71	0,44	10,41	21,39	0,49
12	28-abr-09	19,05	2,63	10,41	19,72	0,53
2	18-fev-09	47,43	10,69	21,42	37,28	0,57
17	13-mai-09	20,06	1,90	12,95	19,47	0,67
34	4-mai-11	12,72	2,65	6,36	8,88	0,72
Total		1267,99	193,06	430,50		
Média					149,72	0,18
Desvio Padrão					182,46	0,19

Figura 5 – Relação entre a precipitação e a razão de abstração inicial: (a) microbacia com vegetação nativa e (b) microbacia com vegetação raleada



A microbacia com vegetação raleada apresentou um CV mais elevado devido aos maiores variações dos valores de λ , verifica-se que esta bacia apresentou 7 eventos com λ maiores que 0,30 contribuindo para aumento do CV. O valor de λ 0,18 para a microbacia com vegetação raleada foi mais próximo ao padrão 0,20 do que na microbacia com vegetação nativa que apresentou λ 0,15. Os valores do potencial de armazenamento médio para a microbacia com vegetação raleada apresentou $S = 149,72$ mm e para a microbacia com vegetação nativa foi de $S = 105,47$ mm. Os maiores valores de S e da razão λ na microbacia raleada já apontam a influência do manejo da vegetação nas respostas hidrológicas perante o modelo CN-NRCS. Observa-se que a microbacia com vegetação nativa possui uma menor abstração o que resulta em um maior escoamento que apresenta um coeficiente de escoamento para os eventos selecionados de 21,2% (Tabela 4); já a microbacia com vegetação raleada possui uma abstração maior provocando um menor escoamento apresentando um coeficiente de escoamento para os eventos selecionados de 15,2% (Tabela 4). Ressalta-se que os elevados valores do coeficiente de escoamento para as microbacias deve-se as condições de umidade antecedente dos eventos selecionados.

Tabela 4 – Coeficiente de escoamento dos eventos selecionados de chuva/deflúvio para as estações chuvas de 2009, 2010, 2011 e 2012 para as microbacias com vegetação nativa e relada

Microbacia	C
vegetação nativa	21,2%
vegetação raleada	15,5%

A condição de escoamento antecedente (AMC) dos eventos investigados (condições de umidade antecedente AMC II e AMC III) contribuiu para a baixa lâmina de abstração inicial e consequente baixa λ em relação ao 0,20 como proposto no método CN-NRCS, como também verificado por Baltas et al. (2007). Esta baixa razão λ , ainda deve-se em parte à declividade das microbacias e dos solos com características argilosas, que apresentam baixa permeabilidade, o que diminuem a capacidade de infiltração e aumenta o escoamento do tipo hortoniano.

3.2 Calibração e validação do CN

Na calibração do CN empregou-se, para a microbacia com vegetação nativa, os seguintes cenários: Cenário 1 – a razão λ padrão de 0,20; Cenário 2 – a razão λ média medida de 0,15 (Tabela 2). Para a calibração na microbacia com vegetação raleada empregou-se: Cenário 3 – a razão λ padrão de 0,20 e Cenário 4 – a razão λ média medida de 0,18 (Tabela 3).

O método CN-NRCS busca representar as perdas hídricas potenciais de uma bacia; quanto menor o valor do parâmetro CN, maior será o armazenamento inicial de uma bacia, reduzindo a possibilidade de escoamento superficial (TYAGI et al., 2008). Neste sentido, verifica-se na Tabela 5 uma leve alteração nos valores de CN calibrados usando a razão abstração inicial proposta pelo modelo CN-NRCS e medida para as condições de estudo. Sendo que a microbacia com vegetação nativa apresentou no cenário 1 CN de 77,6 e no cenário 2 um menor valor de CN 75,3. Assim como a microbacia com vegetação raleada, que apresentou no cenário 1 CN de 73,9 e no cenário 2 um menor valor de CN 72,8. Valores de CN na mesma ordem de grandeza foram encontrados por Figueiredo (2011) também para vegetação caatinga no Ceará, no período de 2005 a 2010, que observou valores de CN = 78. Andrade et al. (2012) usando diferentes métodos para estimativa do CN para a mesma

microbacia nativa mostraram que a média aritmética do CN (78,8) é muito próximo do valor mediano (79,4) e ambos são maiores do que a média geométrica (78,0), sendo que o menor valor de CN (76,3) foi obtido quando se utiliza a abordagem assintótica. Os autores observaram também que os CN observados para a microbacia, variando entre 73 e 86, podem diminuir com o aumento do valor de precipitação pluviométrica, e tendem a um valor constante para grandes eventos que são os eventos que levam a inundações.

Tabela 5 – CN calibrado para as microbacias considerando os cenários de razão de abstração recomendado pelo SCS e medido nesse estudo

	Cenários	λ	CN
1	Microbacia com vegetação nativa	0,20	77,6
2	Microbacia com vegetação nativa	0,15	75,3
1	Microbacia com vegetação raleada	0,20	73,9
2	Microbacia com vegetação raleada	0,18	72,8

Essa leve diferença entre os valores de CN calibrados nas microbacias para a razão λ medida e recomendada, somente se dar em decorrência da ordem de grandeza dos valores de CN calibrado, visto que, de acordo com Hawkins et al. (2002) para menores valores de CN as diferenças são bem mais expressivas. Esses autores estudando as relações entre o CN e a razão λ encontraram que a razão $\lambda = 0,05$ (dados medidos) é mais sensível na mudança do CN que o clássico valor de 0,20 para CN com valores baixos.

A Figura 6 apresenta a relação entre as precipitações pluviométricas efetivas medidas e as estimadas com o uso do CN calibrado nos diferentes cenários. Quando a simulação apresenta acuracidade, os pares de pontos (medidos e estimados) apresentam-se em torno da reta 1:1, a qual conecta os valores computados iguais aos observados, ou seja, a igualdade perfeita. Pelos índices aplicados: Nash-Sutcliffe, coeficiente de correlação, índice de Willmott, coeficiente de confiança ou desempenho e PBIAS (Tabela 6), a precipitação efetiva estimada e medida apresenta boa correlação em todos os cenários, com NSE para validação maior que 0,60 mostrando que para o número de eventos em estudo o CN pode ser calibrado e validado com boa precisão.

Figura 6 – Valores de precipitação efetiva medida e estimada para: (a) microbacia com vegetação nativa e $\lambda = 0,20$; (b) microbacia com vegetação nativa e $\lambda = 0,15$; (c) microbacia com vegetação raleada e $\lambda = 0,20$; e (d) microbacia com vegetação raleada e $\lambda = 0,18$

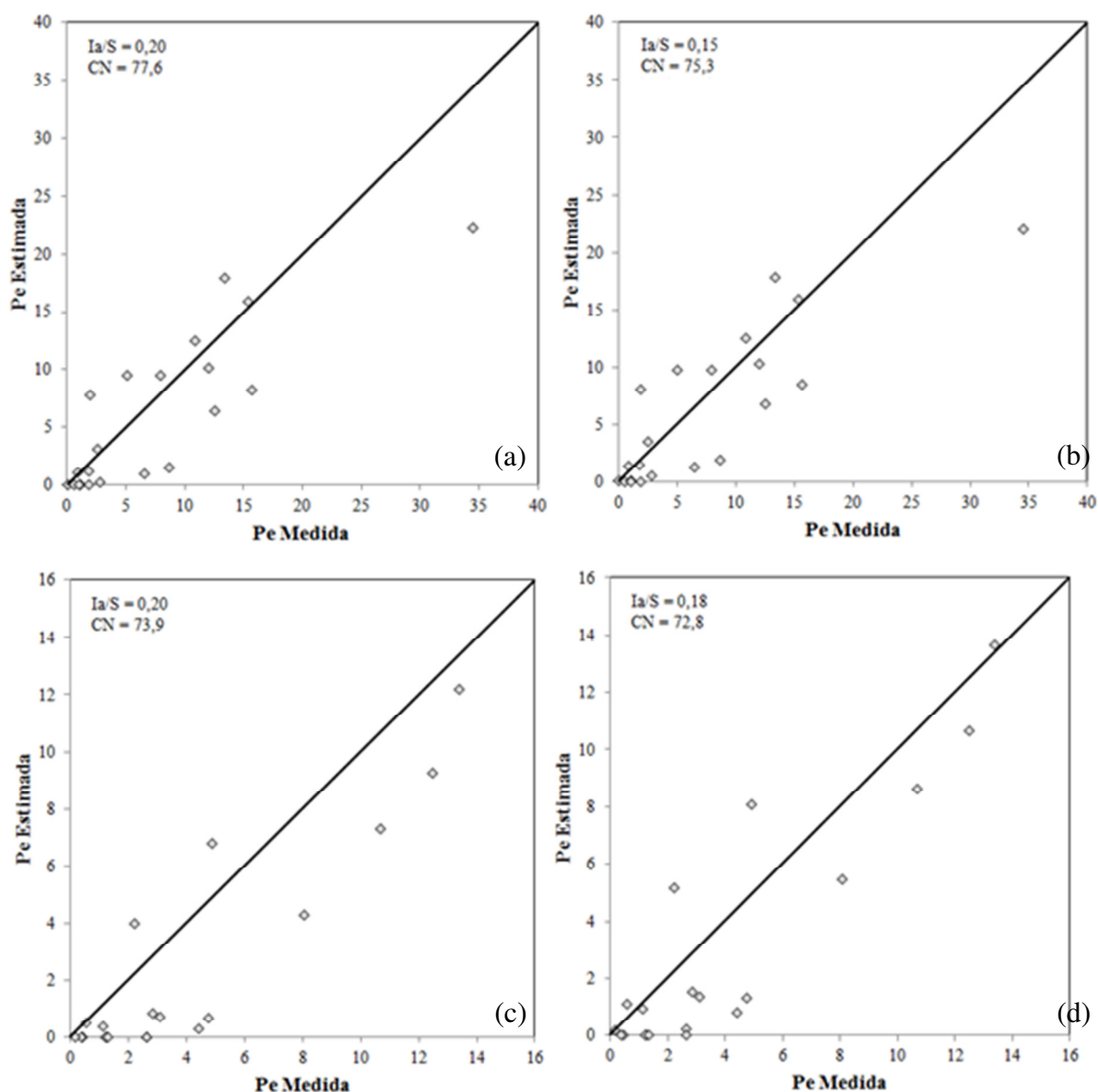


Tabela 6 – Índices de validação aplicados para os cenários estudados

Parâmetros	Cenário 1		Cenário 2		Cenário 3		Cenário 4	
	Validação Cruzada		Validação Cruzada		Validação Cruzada		Validação Cruzada	
NSE	0,73	0,71	0,74	0,71	0,70	0,60	0,74	0,61
Id	0,90	0,92	0,90	0,92	0,91	0,88	0,94	0,87
R	0,85	0,85	0,84	0,85	0,90	0,79	0,90	0,83
C	0,76	0,78	0,76	0,78	0,82	0,70	0,85	0,72
PBIAS (%)	18,31	-5,82	16,15	-7,20	43,74	-0,78	28,11	10,17

Independente do valor da razão da λ usado nos equacionamentos, os CN calibrados e validados para as microbacias estudadas apresentaram valores superiores a 70 (Tabela 5), podendo ser atribuído às condições de escoamento antecedente (AMC) dos eventos investigados (AMC II e AMC III), à característica sedimentar da geologia onde a microbacias estão inseridas e, também, ao grupo hidrológico ao qual o solo foi classificado, D, com elevados teores de argila 2:1 o que confere condutividade hidráulica saturada de $0,2 \text{ mm h}^{-1}$, portanto muito baixa. Araújo e Piedra (2007) mencionaram que os processos envolvidos na formação do escoamento superficial estão mais relacionados à geologia e ao solo do que ao padrão climático.

3.3 Confiabilidade do modelo CN-NRCS

A aplicação de análise de confiabilidade para o CN foi aplicada para a microbacia com vegetação nativa e raleada. Os valores dos parâmetros CN e da razão λ médio e seus respectivos desvios padrões foram calculados para os eventos em estudos nas microbacias e podem ser verificados na Tabela 7. Os valores de médio CN para as microbacias apresentaram CV de até 11%, já os valores médios de λ apresentaram maiores variações, chegando a 104% para microbacia com vegetação raleada.

Tabela 7 – Valores médios, desvio padrão e coeficiente de variação para os parâmetros CN e λ da microbacia com vegetação nativa e raleada

Microbacia	$\overline{\text{CN}}$	σ_{CN}	CV_{CN}	$\bar{\lambda}$	$\sigma_{\lambda/s}$	$\text{CV}_{\lambda/s}$
Nativa	79,7	8,77	11%	0,15	0,08	56%
Raleada	75,5	7,62	10%	0,18	0,19	104%

A média e o desvio padrão da variável de entrada precipitação (P) de cada evento selecionado para as microbacias nativa e raleada, bem como, a análise de confiabilidade do modelo CN-NRCS aplicando o método de Monte Carlo apresentam-se na Tabela 8. Os eventos selecionados para análise de confiabilidade em ambas as microbacias também obedecem às condições de umidade antecedente AMC II e AMC III. De acordo com o método de Monte Carlo os valores de escoamento superficial ou precipitação efetiva (Pe) para os 6 eventos selecionados nas microbacias com vegetação nativa e raleada. A maior parte dos

eventos apresentaram Pe medido entre a faixa do Pe mínimo e Pe máximo exceto para o evento 23/jan/12, em ambas as microbacias, e os eventos de 26/jan/11 e 13/abr/11 para a microbacia raleada. Tomando como exemplo o evento 17/abr/09 onde em ambas as microbacias o Pe medido foi dentro da faixa de Pe mínimo e máximo, com 95% de confiabilidade o Pe estimado para a microbacia nativa pode variar entre 5,4 e 22,0 mm. Esses resultados mostram a baixa confiabilidade do modelo, visto valores da ordem de 75% maiores e menores do que o Pe medido para esse evento (12,6 mm). Já para a microbacia raleada o mesmo evento com 95% de confiabilidade, o Pe estimado pode variar entre 4,2 e 19,0 mm, valores da ordem de 100% maiores e menores do que o Pe medido para esse evento (8,07 mm).

Tabela 8 – Média e desvio padrão da precipitação, bem como, resultados precipitação efetiva dos eventos selecionados para a análise de confiabilidade

Vegetação	Eventos	$\bar{H}$	σ_H	Pe_{min}	Pe_{max}	Pe_{medido}
Nativa	17/abr/09	36,2	0,4	5,4	22,0	12,6
Raleada	17/abr/09	36,2	0,4	4,2	19,0	8,07
Nativa	28/abr/09	20,3	0,9	1,1	9,3	2,8
Raleada	28/abr/09	20,3	0,9	0,9	7,7	2,6
Nativa	08/mai/09	33,8	1,6	4,4	20,3	7,2
Raleada	09/mai/09	33,8	1,6	3,6	17,1	5,3
Nativa	26/jan/11	24,7	2,2	0,2	15,5	1,0
Raleada	26/jan/11	24,7	2,2	1,3	10,9	0,5
Nativa	13/abr/11	28,5	1,6	1,0	18,3	4,9
Raleada	13/abr/11	28,5	1,6	2,2	13,3	0,9
Nativa	23/jan/12	51,3	7,4	5,8	43,2	5,1
Raleada	23/jan/12	51,3	7,4	6,4	34,7	1,5

A baixa confiabilidade do modelo CN-NRCS em decorrência da amplitude das faixas de Pe mínimo e máximo deve-se em grande parte a variabilidade dos parâmetros de entrada (CN e λ). Outra grande fonte de incerteza na modelagem hidrológica, para previsão do escoamento superficial gerado em eventos de chuva-deflúvio, é a variável de entrada precipitação, que reflete diretamente na confiabilidade das respostas geradas pelo modelo (MICHAELLIDES et al., 2009). Mesmo as microbacias apresentando áreas pequenas, o uso de 3 postos e suas combinações, mostram uma leve variação chegando a atingir um CV de 4,7% dentre os eventos em que a análise de confiabilidade foi aplicada, o que implica diretamente nas incertezas da estimativa da Pe. Estudos realizados por Pederson et al. (2010)

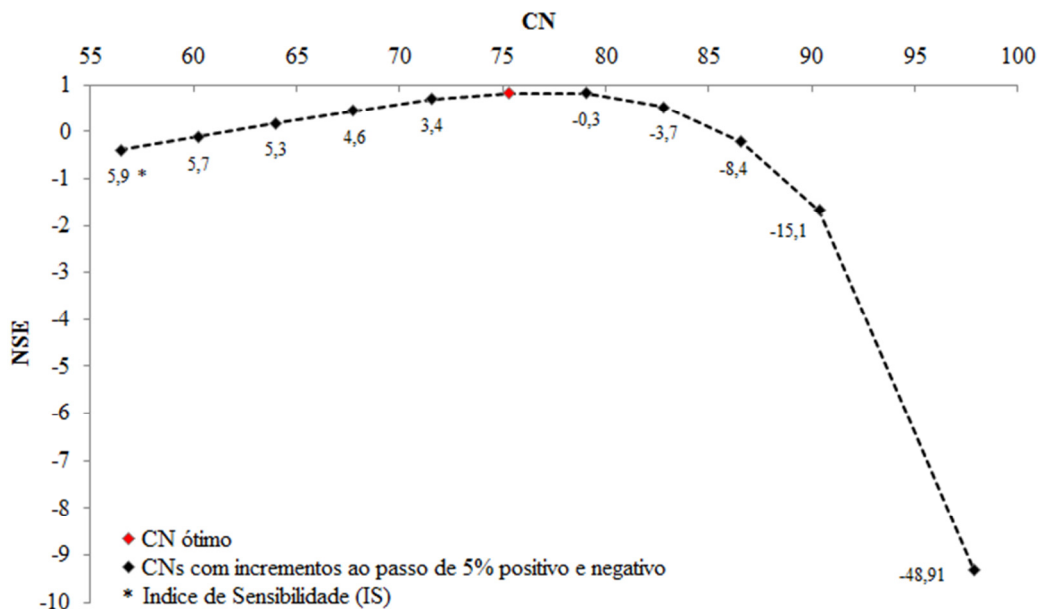
ao avaliarem a variabilidade da distribuição de chuvas em função da densidade de redes de monitoramento em uma área de 0,25 km², verificaram um coeficiente de variação da ordem de 26%, considerando uma variação expressiva, visto que a área é pequena e os postos de medida se encontram a curta distância.

3.4 Sensibilidade dos parâmetros CN e λ

O estudo de sensibilidade do CN e da razão λ foi realizado no propósito de analisar o efeito da variação desses parâmetros nos valores de estimativa do escoamento superficial a partir do modelo hidrológico Número de Curva do Serviço de Conservação do Solo dos EUA (CN-NRCS). As diferenças encontradas na calibração e na validação do CN nos diferentes cenários e a decisão de usar a razão de abstração proposta pelo modelo CN-NRCS ou a razão avaliada para as microbacias em estudo e suas influências nas estimativas do escoamento são verificadas a partir da análise de sensibilidade. Esta análise foi aplicada à microbacia com vegetação nativa, condição natural da vegetação da região em estudo variando-se o CN em incrementos e considerando o λ de 0,15 avaliado para a microbacia. Também foi variado o parâmetro λ em incrementos, considerando-se o CN fixo calibrado de 75,3, para análise das respostas do escoamento superficial estimado em relação ao escoamento superficial medido. Para a avaliação da sensibilidade foi utilizado o coeficiente de Nash-Sutcliffe (NSE). Deste modo, cada mudança nos valores de λ e CN provoca uma mudança nos valores do NSE (Figura 7).

O modelo mostrou-se mais sensível ao parâmetro CN para incrementos positivos do que para incrementos negativos. Para um incremento positivo de 20% (CN passando a ser 90,4) observa-se uma alteração modular de 15,05 unidades no NSE decrescendo de um valor ótimo de 0,74 para -1,67, não aceitável. Já para os incrementos negativos de CN, o modelo é menos sensível, visto que os índices de sensibilidade (IS) obtidos apresentam valores menores, em módulo. Para um incremento negativo de 20% (CN passando a ser 60,2), observa-se uma alteração modular de 2,17 unidades no NSE, passando de 0,74 para 0,65, ainda aceitável.

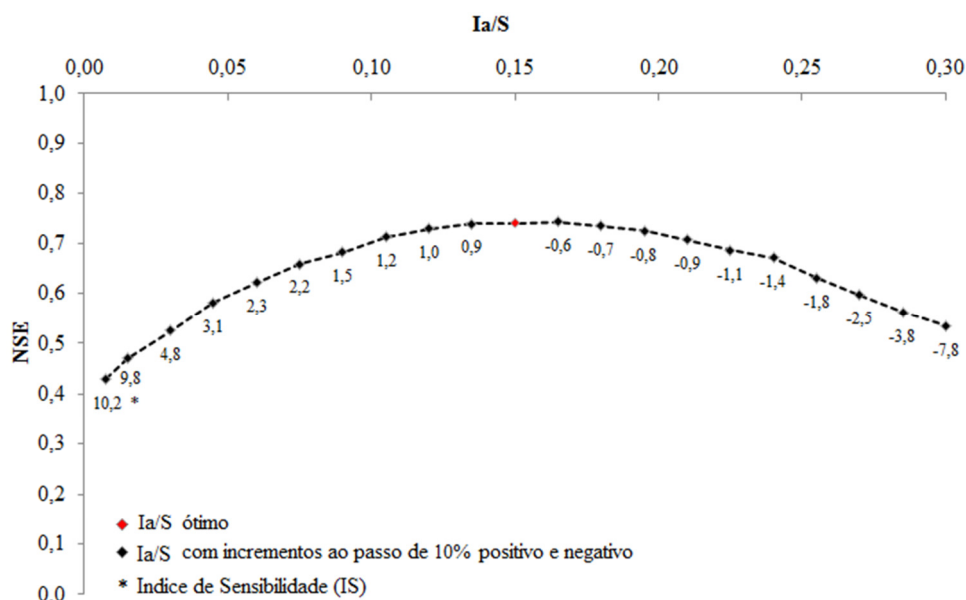
Figura 7 – Análise de sensibilidade do número de curva (CN) para a microbacia com vegetação nativa



Analisando a sensibilidade para a razão λ da microbacia com vegetação nativa (Figura 8), verifica-se que, contrariamente ao CN, esse parâmetro apresenta baixa sensibilidade em ambos os incrementos (positivos ou negativos). De maneira geral, esses resultados mostram que apesar da suposição de $\lambda = 0,20$ ser excepcionalmente alta, o modelo sofre pouca alteração na saída com o uso do λ médio medido. Mesmo para um incremento positivo de 100% (λ passando a ser 0,30) observa-se uma alteração modular de apenas 0,24 unidades no NSE decrescendo de um valor de 0,74 para 0,65, ainda aceitável. O mesmo acontece para os incrementos negativos de λ , mostrando que o modelo é pouco sensível a este parâmetro. Mishra e Singh (2004) avaliaram o impacto da razão λ no modelo CN-NRCS e concluíram que o aumento da constante recomendada ($\lambda = 0,20$), diminui a eficiência do modelo, sendo a eficiência máxima encontrada com valores de $\lambda = 0,01$. Estudos realizados por Bo et al. (2011) avaliando a aplicação do modelo CN-NRCS para estimativa de escoamento superficial em uma microbacia na China, verificaram que a estimativa do escoamento aumenta rapidamente com o aumento dos valores de CN. Por outro lado, estes autores observaram que o escoamento estimado diminui pouco e quase linearmente com o aumento do λ entre 0 e 0,50, mostrando que o modelo CN-NRCS foi muito mais sensível as alterações

nos valores de CN do que da razão λ como verificado nesse estudo e como já foi apontado por Ponce e Hawkins (1996) e Wang e Huang (2008).

Figura 8 – Análise de sensibilidade para da razão de abstração (λ) para a microbacia com vegetação nativa



A sensibilidade desses parâmetros também exerce forte influência para explicação da baixa confiabilidade verificada para o modelo. O parâmetro CN apresentou um CV de apenas 11% (Tabela 7) enquanto o λ apresentou um CV de até 104% (Tabela 6), no entanto, como visto o CN apresenta maior sensibilidade para estimativas do escoamento, notadamente para incrementos positivos, o que com um CV de até 11% pode resultar em valores estimados de Pe bem distantes do medido, diminuindo assim a confiabilidade na saída do modelo. Quanto a razão λ , apesar de um elevado CV, a sensibilidade desse parâmetro mostrou que mesmo com incrementos de 100% os valores estimados do modelo continuam aceitáveis.

4 CONCLUSÕES

Utilizando o modelo CN-NRCS e para as condições das microbacias estudadas, com vegetação *Caatinga* nativa e raleada localizada no semiárido do Ceará, conclui-se que:

- A razão λ medida para as microbacias foram inferiores ao valor recomendado pelo método CN-NRCS;

- Independente do valor da razão λ usados nos equacionamentos, recomendado ou medido para as microbacias, os valores de CN calibrados e validados foram da ordem de 73 a 78 em decorrência das condições de umidade antecedente dos eventos investigados, dos solos com características argilosas que apresentam baixa permeabilidade, bem como, influenciados pela característica sedimentar da geologia e declividade das microbacias;
- O modelo CN-NRCS foi muito mais sensível a alterações nos valores do parâmetro CN, notadamente para incrementos positivos, do que para alterações na razão λ .
- O modelo CN-NRCS apresenta baixa confiabilidade, em virtude da variação dos valores dos parâmetros e ainda influenciado pela sensibilidade dos parâmetros de entrada (CN e λ), bem como, das incertezas na variável de entrada precipitação.

REFERÊNCIAS

AGRITEMPO - Sistema de monitoramento agrometeorológico. **Dados meteorológicos - Iguatu (INMET), dados históricos**. Disponível em: <http://www.agritempo.gov.br/agroclima/sumario>. Acesso em: 16 de maio de 2011.

ANDRADE, E. M.; PALÁCIO, H. A. Q.; SANTOS, J. C. N.; GUERREIRO, M. J. S.; RODRIGUES, J. A. Runoff curve number for a small forested watershed in a semiarid region of Brazil. In: 21st Century Watershed Technology Conference and Workshop, Bary, Italy. **Anais...ASABE**, 2012.

ARAÚJO, J. C.; PIEDRA, J. I. G. Comparative hydrology: analysis of a semiarid and a humid tropical watershed. **Hydrological Processes**, v. 23, p. 1169–1178, 2009.

BALTAS, E.A.; DERVOS, N.A.; MIMIKOU, M.A. Technical note: determination of the SCS initial abstraction ratio in an experimental watershed in Greece. **Hydrology and Earth System Sciences**. v.11, n.6, p.1825-1829. Nov. 2007.

BO, X.; QING-HAI, W.; JUN, F.; FENG-PENG, F.; QUAN-HOU, D. Application of the SCS-CN Model to Runoff Estimation in a Small Watershed with High Spatial Heterogeneity. **Pedosphere**. 21(6): 738–749, 2011.

CHOW, V. T., MAIDMENT, D.R., MAYS, L.W. **Applied hydrology**. McGraw-Hill International Editions, Singapura, 1988.

SCS (Soil Conservation Service), 1972. **SCS National Engineering Handbook**, Section 4. Hydrology, Soil Conservation Service. US Department of Agriculture, Washington, DC.

EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2ª edição. Rio de Janeiro, CNPS/EMBRAPA, 2006. 306 p.

FIGUEIREDO, J. V. **Início da geração do escoamento superficial em uma bacia semiárida em Caatinga preservada**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE, Brasil. 2011.

HAWKINS, R.H., JIANG, R., WOODWARD, D.E., HJELMFELT, A.T., VAN MULLEM, J.A., QUAN, Q.D. **Runoff curve number method: examination of the initial abstraction ratio**. Proceedings of the Second Federal Interagency Hydrologic Modeling Conference, Las Vegas, Nevada. U.S. Geological Survey, Lakewood, Colorado. CD-ROM. 2002

LIU, X. Z.; LI, J. Z. Application of SCS model in estimation of runoff from small watershed in Loess Plateau of China. **Chin. Geogra. Sci.**, v. 18, n. 3, p. 235–241, 2008.

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

McCUEN, R.H.; SNYDER, W. M. **Hydrologic modelling: Statistical methods and applications**. EnglewoodCliffs, N. J.: Prentice Hall. 1986.

MELLO, C. R.; LIMA, J. M.; SILVA, A. M.; LOPES, D. Abstração inicial da precipitação em microbacia hidrográfica com escoamento efêmero. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.7, n.3, p.494-500, 2003.

MISHRA, S.K.; SINGH, V.P. Long-term hydrological simulation based on the Soil Conservation Service curve number. **Hydrological Processes**, v.18, n.7, p.1291-1313, 2004.

MISHRA, S. K., TYAGI, J. V., SINGH, V. P. AND SINGH, R. SCS-CN-based modeling of sediment yield. **Journal of Hydrology**.v. 324, n. 1–4, p. 301–322, 2006.

MICHAELIDES, S.; LEVIZZANI, V.; ANAGNOSTOU, E.; BAUER, P.; KASPARIS, T.; LANE, J. E. Precipitation: Measurement, remote sensing, climatology and modeling. **Atmospheric Research**, v. 94, p. 512–533, 2009.

NASH, J. E.; SUTCLIFFE, J. V. River flow forecasting through conceptual models: a discussion of principles. **Journal of Hydrology**. v. 10, p. 282-290, 1970.

NEARING, M. A.; DEER-ASCOUGH, L.; LAFLIN, J.M. Sensitivity analysis of the WEPP hillslope profile erosion model. **Transactions of the ASAE**, v.33, n.3, p.839-849, 1990.

PERDERSEN, L.; JENSEN, N. E.; CHRISTENSEN, L. E.; MADSEN, H. Quantification of the spatial variability of rainfall based on a dense network of rain gauges. **Atmospheric Research**.v. 95 , p. 441–454, 2010.

PONCE, V. M. AND HAWKINS, R. H. Runoff curve number: has it reached maturity? **J. Hydrol. Eng.**, v. 1, n. 1, p. 11–19, 1996.

SAHU, R. K., MISHRA, S. K. AND ELDHO, T. I. Comparative evaluation of SCS-CN inspired models in applications to classified datasets. **Agr. Water Manage.**, v. 97, n. 5, p. 749–756, 2010.

SHI, Z. H.; CHEN, L. D.; FANG, N. F.; QIN, D. F.; CAI, C. F. Research on the SCS-CN initial abstraction ratio using rainfall-runoff event analysis in the Three Gorges Area, China. **Catena**. v. 77, p. 1–7, 2009.

SINGH, V. P. ed. Computer models of watershed hydrology. Colorado, **water resources publications**, p. 311-366, 2002.

THORNTHWAITE, C. W. An approach toward a rational classification of climate. *Geogr. Rev.*, v. 38, p. 55-94, 1948.

TYAGI, J. V.; MISHRA, S. K.; SINGH, R.; SINGH, V. P. SCS-CN based time-distributed sediment yield model. **Journal of Hydrology**, v. 352, p. 388– 403, 2008.

WANG, Y. AND HUANG, M. B. Application of the SCS-CN method on runoff estimation in small watershed on Loess Plateau. **Sci. Soil Water Conserv.** (in Chinese). v. 6, n. 6, p. 87–91, 2008.