



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

FRANCISCO EMANOEL FIRMINO GOMES

PROCESSOS HIDROSEDIMENTOLÓGICOS EM UMA BACIA
EXPERIMENTAL DO SEMIÁRIDO BRASILEIRO

FORTALEZA

2016

FRANCISCO EMANOEL FIRMINO GOMES

PROCESSOS HIDROSEDIMENTOLÓGICOS EM UMA BACIA EXPERIMENTAL DO
SEMIÁRIDO BRASILEIRO

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

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

Orientador: Prof. Dr. George Leite Mamede

FORTALEZA
2016

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- G614p Gomes, Francisco Emanuel Firmino.
Processos hidrossedimentológicos em uma bacia experimental do semiárido brasileiro. / Francisco Emanuel Firmino Gomes. – 2016.
68 f. : il.
- Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Fortaleza, 2016.
Orientação: Prof. Dr. George Leite Mamede.
1. Manejo de bacias. 2. Erosão. 3. hidrossedimentologia. 4. Perda de solo. I. Título.
- CDD 630
-

PROCESSOS HIDROSEDIMENTOLÓGICOS EM UMA BACIA EXPERIMENTAL DO
SEMIÁRIDO BRASILEIRO

Dissertação de Mestrado apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola 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.

Aprovada em: 23/12/2016.

BANCA EXAMINADORA

Prof^o. Dr. George Leite Mamede (Orientador)
Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira (UNILAB)

Prof^o. Dr. Carlos Alexandre Gomes Costa
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof^a. Dra. Helba Araújo de Queiroz Palácio
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE campus Iguatu)

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, a Deus por ter-me concedido força e determinação para enfrentar toda as dificuldades do dia a dia.

A toda minha família, pela força, confiança, incentivo e o grande apoio empregado.

Ao professor George Leite Mamede pela oportunidade oferecida de trabalhar nesse mestrado e por todo conhecimento repassado.

A minha noiva pelo companheirismo, carinho, amor e ensetivo prestado.

A professora Helba Araújo de Queiroz Palácio, por ter despertado em mim a vontade de ser pesquisador.

A todos os funcionários da Fazenda Experimental Vale do Curú, nas pessoas de Seu José Amilton, Dona Ana, Gleciane, José Airton, tia Dona Fran, Dona Julia, Iara, Cleiton, Eron, Seu Didí, Selio.

Ao Laboratório de Mecânica dos Solos e Pavimentação - UFC (LMSP - UFC), pelo espaço concedido para análises e atenção prestada por todo os seus servidores.

Aos colegas de trabalho e companheiros de campo, pela coleta de dados e ajuda na realização das análises: Eric Pereira, Paulilo Palácio.

A todos os colegas do curso de mestrado e aos professores que me enriqueceram com seu conhecimento.

A todos, que de alguma forma contribuíram para minha formação, desde a infância até os dias de hoje.

A todos, que contribuíram de forma direta ou indireta. Deixo o meu muito OBRIGADO!

RESUMO

GOMES, Francisco Emanuel Firmino. Universidade Federal do Ceará. Dezembro de 2016.

Processos hidrossedimentológicos em uma bacia experimental do semiárido brasileiro.

Orientador: Prof. Dr. George Leite Mamede

O bioma caatinga está localizado na região semiárida mais populosa do planeta e, mesmo assim, ainda é muito carente de estudos relacionados à área de hidrossedimentologia, sobretudo no monitoramento de variáveis hidrológicas e sedimentológicas para melhor compreensão dos processos envolvidos. Neste contexto, esta pesquisa tem como objetivo o monitoramento e modelagem dos processos hidrossedimentológicos na Bacia Experimental do Vale do Curu - BEVC, com área de 284,50 ha, situada na zona rural do município de Pentecoste, região semiárida do estado de Ceará, na Fazenda Experimental da Universidade Federal do Ceará. Para monitoramento dos eventos de escoamentos na bacia foram instaladas duas seções de controle equipadas com vertedores regulares, pluviômetros, pluviógrafo, tanque classe A e sensores de nível automáticos, sendo uma na Microbacia Experimental do Vale do Curu - MEVC com 13,80 ha e outra, imediatamente à montante do Açude Escola, localizado no exutório da BEVC, ocupando uma área de 256,60 há 18 vezes maior que a MEVC. Para caracterização da cobertura vegetal e estimativa do Fator de Uso de Ocupação do Solo (Fator C) foram instaladas duas parcelas de Wischmeier na MEVC com cobertura de Caatinga, sendo uma com 40 anos de pousio (preservada) e outra com 8 anos de pousio (rala), compreendendo estes usos conjuntamente 93,30% da área da BEVC. Os valores do fator C estimados com base nas medições das demais variáveis da RUSLE foram 0,0061 para caatinga preservada e de 0,0126 para caatinga raleada, respectivamente. A erosão na bacia foi estimada para cada evento Aplicando-se o modelo RUSLE com suporte de ferramentas do SIG para as bacias aninhadas em um total de seis eventos de escoamento foi possível estimar as taxas médias de erosão de 0,95 ton ha⁻¹ na BEVC e de 0,11 ton ha⁻¹ na MEVC sendo estas medias em torno de 8 vezes maior de uma bacia pra outra. A produção de sedimento medida nas seções de controle das duas bacias revela que a MEVC possui uma maior razão de aporte de sedimento correspondendo a 26%, enquanto que a BEVC apenas 3,15%.

Palavras chave: Manejo de bacias. Erosão. Hidrossedimentologia. Perda de solo.

ABSTRACT

GOMES, Francisco Emanuel Firmino. Universidade Federal do Ceará. December 2016.
Hydrosedimentological processes in an experimental basin of the Brazilian semiarid region. Advisor: Prof. Dr. George Leite Mamede

The caatinga biome is located in the most populous semi-arid region of the planet, and yet it is still very lacking in studies related to the hydrosedimentology area, especially in the monitoring of hydrological and sedimentological variables to better understand the processes involved. In this context, this research has the objective of monitoring and modeling the hydrosedimentological processes in the Curu Valley Experimental Basin - BEVC, with an area of 284.50 ha, located in the rural area of the municipality of Pentecoste, semi-arid region of the state of Ceará, in the Experimental Farm of the Federal University of Ceará. Two control sections equipped with regular sprinklers, rain gauges, rain gauge, class A tank and automatic level sensors were installed to monitor flow events in the basin, one at the Curu Valley Experimental Microbasin - MEVC with 13.80 ha and another, immediately upstream of the Açude Escola, located in the BEVC exclave, occupying an area of 256.60, which is 18 times larger than the MEVC. Two parcels of Wischmeier were planted at the MEVC with Caatinga cover, one with 40 years of fallow (preserved) and one with 8 years of fallow (Factor C), These uses together comprising 93.30% of the BEVC area. Factor C values estimated based on the measurements of the other RUSLE variables were 0.0061 for preserved caatinga and 0.0126 for thinned caatinga, respectively. The erosion in the basin was estimated for each event. Applying the RUSLE model with GIS tool support for the nested basins in a total of six runoff events, it was possible to estimate the average erosion rates of 0.95 ton ha⁻¹ in the BEVC and of 0.11 ton ha⁻¹ in the MEVC, these means being around 8 times larger from one basin to another. The sediment yield measured in the control sections of the two basins reveals that the MEVC has a higher ratio of sediment input corresponding to 26%, while the BEVC only 3.15%.

Key words: Basin management. Erosion. Hydrosedimentologia. Loss of soil.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Microbacia Experimental da Fazenda Experimental Vale do Curú, UFC....	25
Figura 2	Mapa de classificação de solo na BEVC	26
Figura 3	instrumentos de aquisição de dados de precipitação pluviométrica.	28
Figura 4	Vertedouros para medida do volume escoado na MEVC (a) e na BEVC (b)	28
Figura 5	Parcelas de erosão (Wischmeier) no período seco: parcelas P08 (a) e P40 (b); e no período chuvoso: parcelas P08 (c) e P40(d).....	30
Figura 6	Coletores de água e sedimento	31
Figura 7	Distribuição espacial dos pontos de coleta para determinação de erodibilidade do solo.....	36
Figura 8	Coletor de amostras indeformadas (a), cravação do amostrador com cilindro (b) e coleta do material para análise granulométrica e retirada do cilindro (c)	37
Figura 9	Amostras secando ao ar (a), quarteamento das amostras (b), ensaio de peneiramento (c) e ensaio de sedimentação (d).....	38
Figura 10	Preparação para ensaio de permeabilidade (a), amostra preparada (b), permeômetro de carga variável durante ensaio de permeabilidade (c).....	38
Figura 11	Precipitação pluviométrica acumulada de 24 horas, 2015(a), 2016 (b)	42
Figura 12	Escoamento nas parcelas de erosão para ano de 2015 (a), e 2016 (b).....	43
Figura 13	Perda de solo nas parcelas com diferentes períodos de pousio, para o ano de 2015 (a) e para 2016 (b).....	45
Figura 14	Erosão observada nas parcelas versus erosão estimada usando o fator C calibrado	47
Figura 15	Espacialização da erodibilidade do solo para a Bacia Experimental Vale do Curú - BEVC.	54
Figura 16	Elementos resultantes do modelo digital de elevação: áreas de contribuição (a); declividade percentual (b)	55
Figura 17	Espacialização do fator topográfico na bacia em estudo	56
Figura 18	Identificação da cobertura vegetal da área de estudo e espacialização dos valores de fator C.....	57
Figura 19	Espacialização das taxas de Erosão estimada pela Rusle em ton ha-1	58
Figura 20	Erosão estimada em eventos individuais na MEVC, dia 10-abr-2015 (a) e dia 13-abr-2015 (b)	59
Figura 21	Erosão estimada em eventos individuais na BEVC, dia 80-abr-2015 (a); dia 10-abr-2015 (b); dia 13-abr-2015 (c) dia 14-abr-2015 (d)	60

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Descrição da instrumentação de monitoramento da BEVC	27
Tabela 2	Valores de S usados na equação de determinação do fator K	34
Tabela 3	Valores de P usados na equação de determinação do fator K	34
Tabela 4	Síntese dos processos hidrológicos nas parcelas para os anos de 2015 e 2016	44
Tabela 5	Fatores da Equação Universal de Perda de Solo Revisada - Rusle , taxas de perda de solo e valores indiretos de fator C para as parcelas de erosão	46
Tabela 6	Eventos de escoamento superficial nas unidades e estudo e suas respectivas concentrações de sólidos.....	48
Tabela 7	Síntese hidrossedimentológica das microbacias em estudo.....	48
Tabela 8	Granulometria do solo nos pontos de determinação de erodibilidade	51
Tabela 9	Percentual de matéria orgânica; permeabilidade, classes de permeabilidade e estrutura; Fator K, erodibilidade do solo classificada segundo Carvalho, (2008) para os solos da BEVC.....	53
Tabela 10	Totais erodidos por evento acompanhados das razões de aporte observadas e obtidas pelo modelo de Maner	61

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
2	OBJETIVOS	13
3	REVISÃO DE LITERATURA	14
3.1	Erosão	14
3.1.1	Conceitos e fundamentação teórica	14
3.2	Erosão no bioma caatinga	16
3.3	Estimativas de perdas de solo por erosão	16
3.4	Fatores da rusle	17
3.4.1	Fator erosividade (Fator R)	17
3.4.2	Fator erodibilidade (Fator K)	18
3.4.3	Fatores topográficos (Fator LS)	20
3.4.4	Fator de Cobertura (Fator C)	21
3.4.5	Fator de Práticas Conservacionistas (Fator P).....	22
3.5	Razão de aporte de sedimento	23
3.6	Perda de solo máxima aceitável	23
4.	MATERIAL E MÉTODOS	25
4.1	Caracterização da área	25
4.2	Monitoramento da área	27
4.2.1	Precipitação	27
4.2.2	Escoamento superficial.....	28
4.2.3	Parcelas experimentais	29
4.3	Medidas de perda de solo	31
4.3.1	Parcelas experimentais	31
4.3.2	Microbacia.....	31
4.4	Estimativas de perda de solo	32
4.4.1	Parcelas Experimentais.....	32
4.4.2	Estimativa da produção de sedimentos na BEVC e MEVC.....	35
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	42
5.1	Dinâmica dos processos hidrossedimentológicos nas parcelas	42
5.2	Dinâmica dos processos hidrossedimentológicos nas bacias experimentais	47

5.3	Modelagem dos processos hidrossedimentológicos nas bacias experimentais	49
5.3.1	Erosividade (R).....	49
5.3.2	Erodibilidade (K).....	49
5.3.3	Fator topográfico (LS).....	54
5.3.4	Fator de cobertura (C)	56
5.3.5	Erosão estimada.....	57
5.3.6	Razão de Aporte de Sedimento (SDR).....	58
6	CONCLUSÕES	62
	REFERÊNCIAS	62

1 INTRODUÇÃO

O Semiárido abrange uma área de aproximadamente 1.000.000 de quilômetros quadrados, onde vivem cerca de 22 milhões de pessoas, que representam 46% da população nordestina e 13% da brasileira (MALVEZZI, 2007). De acordo com Albuquerque *et al.* (2002), a acentuada pressão demográfica no semiárido do Nordeste brasileiro tem demandado um crescente aumento por produtos agrícolas e florestais. Este rápido incremento da produção agrícola tem ocorrido à custa do desmatamento indiscriminado da Caatinga, com consequente degradação do solo.

A erosão hídrica do solo é um processo físico de desagregação, transporte e deposição de partículas do solo, provocado pela ação da água das chuvas e do escoamento superficial, e acelerado pela ação antrópica (INÁCIO *et al.*, 2007). De acordo com Albuquerque *et al.*, (2002) à medida que o manejo do solo, nas diversas atividades humanas, elimina a cobertura vegetal, sua superfície fica mais exposta à ação do impacto das gotas de chuva e da enxurrada. Desta forma, tanto o impacto das gotas de chuva quanto a enxurrada contribuem para modificar as condições físicas da superfície do solo, alterando a rugosidade superficial, a porosidade e a taxa de infiltração de água.

Os efeitos negativos da erosão do solo incluem a redução da fertilidade do solo, redução da capacidade de armazenamento de água no solo, perdas de matéria orgânica, poluição da água, assoreamento (CERDAN *et al.*, 2010), aumento do risco de desertificação, destruição das nascentes, modificação da calha dos rios pelo desmoronamento e deposição de sedimentos no leito, formação de sulcos indesejáveis no terreno e poluição dos corpos hídricos provocando aumento da turbidez na água (CARVALHO, 2008).

Já com relação aos recursos hídricos, as principais consequências da intensificação dos processos hidrossedimentológicos são o assoreamento de mananciais e a mudança nos padrões de qualidade da água. O aporte de sedimentos a reservatórios superficiais decorrente da erosão dos solos na bacia hidrográfica contribuinte tem impactos significativos na disponibilidade hídrica no Nordeste do Brasil, onde aproximadamente 90% da água utilizada para abastecimento humano são armazenados nessas estruturas (ARAÚJO *et al.*, 2004).

De acordo com Wischmeier & Smith, (1978) as ameaças da erosão tem contribuído para a urgência de se quantificar e controlar, de forma racional, as causas do processo erosivo. A necessidade de se determinar uma metodologia capaz de avaliar com precisão os fatores que causam a erosão e a estimativa das perdas de solo ocasionadas por tal

ocorrência, tem resultado num grande número de pesquisas. Dentre essas metodologias, a Equação Universal de Perdas de Solo Revisada (RUSLE) é uma das mais utilizadas, visto que permite a previsão das perdas de solo causadas pela erosão e indica quais os fatores que exercem os maiores efeitos sobre as perdas de solo (ALBUQUERQUE, 2005).

2 OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo principal o monitoramento dos processos hidrossedimentológicos relacionados com Equação Universal de Perda de Solo Revisada – RUSLE na Bacia Experimental do Vale do Curú – BEVC e em uma microbacia aninhada denominada Microbacia Experimental do Vale do Curú (MEVC).

Como objetivos específicos propõem-se:

- Estimar a erosão e produção de sedimentos em duas parcelas de erosão (Wischmeier) em área com cobertura de Caatinga com diferentes períodos de pousio, de 8 e 40 anos;
- Produzir um banco de dados de variáveis hidrológicas e sedimentológicas em área do Bioma Caatinga;
- Estimar a variabilidade espacial da produção de sedimentos nas bacias aninhadas BEVC e MEVC.

3 REVISÃO DE LITERATURA

3.1 Erosão

3.1.1 Conceitos e fundamentação teórica

Erosão é o fenômeno do desgaste das rochas e solos, com desagregação, deslocamento ou arrastamento das partículas por ação da água ou outros agentes, como o vento (CARVALHO, 2008). A erosão é um fenômeno cujo impacto sobre os recursos naturais renováveis tem preocupado governos e instituições em diferentes partes do mundo. As questões relacionadas à erosão têm aumentado consideravelmente nos últimos anos, especialmente em regiões semiáridas de países como o Brasil, onde grande parte da população depende de atividades econômicas ligadas à agricultura (SANTOS, 2012).

Guerra (1999) destaca que a erosão hídrica tem abrangência em quase toda a superfície terrestre, em especial nas áreas com clima tropical, onde os totais pluviométricos são bem mais elevados do que em outras partes do planeta. Além disso, em muitas dessas áreas, as chuvas concentram-se em poucos meses do ano e apresenta uma alta intensidade, o que agrava ainda mais esse problema. Tal situação, ainda pode ser agravada, dado que, por ser um processo cíclico, a erosão hídrica acelera cada vez mais a degradação do meio ambiente, uma vez que os processos erosivos geram a remoção da matéria orgânica e de nutrientes do solo de um lugar para outro, tornando os locais que sofreram perdas, ainda mais susceptíveis (AGUIAR *et al*, 2006).

Há duas formas de erosão: geológica e a acelerada. A erosão geológica é aquela processada normalmente, sendo também chamada de erosão natural ou normal, envolvendo o arranque das partículas ou materiais (solos, formações superficiais e pedras) e o seu transporte ou deslocamento, sem intervenção humana, atuando paulatinamente em todos os meios (CARVALHO, 2008). Entretanto, quando o equilíbrio é rompido às taxas de erosão se intensificam e ocorre o que se chama de erosão acelerada (WIEGAND, 2009).

A erosão acelerada é chamada de erosão antrópica ou induzida pelo homem, ou dos solos agrícolas e obras, é aquela provocada por ações humanas. A erosão provocada por catástrofes, como terremotos, grandes enchentes, erupções vulcânicas poderiam estar incluída nesse grupo apesar de não serem antrópicas (CARVALHO, 2008). O fenômeno da erosão acelerada ou antrópica é tão antigo quanto à própria agricultura. As civilizações, ao longo do tempo, se estabeleceram em um sistema fixo de vida, o que intensificou a

necessidade de uso do solo, levando à destruição dos biomas anteriormente existentes e acarretando exposição do solo às forças erosivas (BERTONI; LOMBARDI NETO, 2008).

Os agentes erosivos são elementos do meio físico que causam, ou afetam, diretamente a erosão, podendo ser agentes ativos e passivos (CARVALHO, 2008). De acordo com o autor supracitado, dos agentes ativos podem – se citar: água, temperatura, insolação, vento, gelo, neve, ação de micro-organismos e a ação humana. E dos agentes passivos, são a topografia, a gravidade, o tipo de solo, a cobertura vegetal, as formações superficiais e as praticas gerais realizadas pelo homem.

A erosão do solo é o desgaste da superfície da terra por parte das forças físicas, tais como chuva, fluxo de água, vento, gelo, as mudanças de temperatura, a gravidade ou outros agentes naturais ou antropogênicos que desagregam e removem o solo ou material geológico de um ponto sobre a superfície da terra e o deposita em outra parte (CARVALHO, 2008).

Os efeitos negativos da erosão do solo incluem a redução da fertilidade do solo, redução da sua capacidade de armazenamento de água, perdas de matéria orgânica, poluição da água, assoreamento (CERDAN *et al.*, 2010), aumento do risco de desertificação, destruição das nascentes, modificação da calha dos rios pelo desmoronamento e deposição de sedimentos no leito, formação de sulcos indesejáveis no terreno e poluição dos corpos hídricos provocando aumento da turbidez na água (CARVALHO, 2008).

De acordo com Bertol *et al.*, (2007) pode-se considerar que os efeitos ambientais fora do local de origem da erosão, decorrentes da deposição de sedimentos, são importantes. Foster, (1982) afirma que os sedimentos transportados por erosão entre sulcos são predominantemente constituídos de colóides minerais e orgânicos. Essas partículas e compostos são muito ativos quimicamente e, por isso, em geral são enriquecidos de elementos minerais adsorvidos. Por isso, tais frações constituem causa da eutrofização dos mananciais de água onde elas se depositam (BERTOL, 2007). Araújo (2003) alerta que os sedimentos carregados e depositados nos açudes do Semiárido apresentam um grande potencial de deterioração quantitativo e qualitativo da água ofertada superficialmente.

Todos esses pontos negativos podem fundamentalmente levar a desafios sociais, tais como o abandono das terras e o declínio das comunidades rurais provocando a emigração destas comunidades para as cidades, o que é chamado de êxodo rural (BAKKER *et al.*, 2005)

3.2 Erosão no bioma caatinga

O bioma Caatinga é caracterizado por formações vegetais xerófilas, lenhosas, decíduas, com muitas espécies espinhosas, compreendendo um estrato arbóreo esparso, outro arbóreo-arbustivo e/ou arbustivo, e um herbáceo estacional, conforme o período das chuvas. O termo caatinga é de origem indígena que significa vegetação aberta, clara ou branca, cuja aparência típica, acinzentada, se verifica no período seco que varia normalmente de 6 a 8 meses. O semiárido é o ambiente de domínio da caatinga onde as precipitações pluviométricas são muito irregulares, com médias anuais variando na faixa de 400 a 800 mm. Já as temperaturas são relativamente estáveis, com média anual na faixa de 24 a 26 °C, podendo ser atenuadas nas áreas mais elevadas para uma média ao redor de 22 °C (JACOMINE, 1996; BRASIL, 1973). Nesse ambiente a evaporação potencial média anual situa-se ao redor de 2000 mm (SÁ; SILVA, 2010).

As características do solo da Caatinga estão controladas pelas condições de clima, geomorfologia, quantidade e intensidade da chuva, radiação solar, temperatura, umidade e declividade do terreno, bem como pelas comunidades de plantas que nele se desenvolvem (MALDONADO, 2005). Na região semiárida, a utilização da vegetação da Caatinga em diversas atividades econômicas gera impactos de alto potencial de degradação, colocando em desequilíbrio todo este ecossistema (PRUDÊNCIO, 2009). A destruição da cobertura vegetal leva a uma maior exposição da superfície do solo e conseqüente modificação dos microclimas locais. Este quadro condiciona também a perda de solo pela ação dos agentes erosivos.

3.3 Estimativas de perdas de solo por erosão

De acordo com Carvalho (2008), uma forma de obter a taxa de perda de solo é pela colocação de coletores apropriados, em posições adequadas, para a retenção de todo o sedimento das áreas em estudo, sendo usado para determinação de parâmetros de equações. Os esforços para o desenvolvimento de equações preditivas da perda de solo iniciaram-se a partir de 1940 no Corn Belt nos Estados Unidos (BERTONI; LOMBARDI NETO, 2008). As equações que expressam a medida quantitativa da perda de solo são úteis para estudo de controle de erosão. Além das equações, a estimativa de perdas de solo pode ser feita com modelos paramétricos, devido à possibilidade de extensão ao estudo de erosão em bacia

hidrográfica, por modelos de estimativa direta da degradação específica (CARVALHO, 2008).

De acordo com Dalla (2011) a quantificação do solo perdido em uma bacia hidrográfica, requer um conhecimento detalhado dos fatores que causam esse processo, e suas inter-relações. Por isso o conhecimento e o monitoramento dos fatores que influenciam a erosão hídrica por meio de modelos preditivos são fundamentais para garantir a produtividade e uso sustentável dos recursos naturais (MARTINS, 2005).

De acordo com Santos (2009) a Equação Universal de Perda de Solo Revisada (conhecida como RUSLE) é um dos modelos matemáticos utilizados na predição de perdas de solo e planejamento conservacionista, mais usado no mundo. O produto dos fatores da RUSLE permite calcular com aproximações a erosão localizada, uma vez que a base experimental da USLE foram lotes. Assim, para se calcular a erosão em toda uma bacia, deve se considerar o fator de depósito e retenção difusa (SDR - *Sediment Delivery Ratio*) do sedimento para se chegar ao cálculo da erosão total da bacia (ARAÚJO, 2003). A USLE é um modelo empírico desenvolvido pelo serviço de pesquisa em agricultura (Agricultural Research Service) em cooperação com a Universidade de Purdue, nos Estados Unidos, a partir da evolução de equações de perda de solo elaboradas anteriormente e da reunião e interpretação analítica e estatística de dados de perdas de solo para parcelas experimentais (DALLA, 2011).

3.4 Fatores da rusle

3.4.1 Fator erosividade (Fator R)

O fator R (erosividade da chuva) expressa a capacidade dos agentes erosivos (chuva e escoamento superficial) em promover a desagregação do solo. Esse fator considera a energia cinética da chuva que depende tanto do tamanho das gotas como da intensidade da precipitação (CARVALHO, 2008). Esta interação pode resultar num maior ou menor grau de desagregação e um transporte morro abaixo das partículas conforme a quantidade de energia e intensidade de chuva, considerando um mesmo tipo de solo, mesmas condições topográficas e ainda cobertura e manejo do solo (PEIXOTO, 2013). De acordo com Pruski (2006) para o processo de erosão hídrica, o total anual precipitado exerce pouca influência, sendo os principais fatores responsáveis nesse processo à distribuição do tamanho, a

velocidade de queda, o número, momento e a energia cinética da chuva, bem como a intensidade, duração e frequência da chuva.

O valor R da USLE, para dado local, nada mais é do que a média dos valores anuais do índice de erosão (EI_{30}) para um período longo de tempo (vinte anos ou mais) (BERTONI & LOMBARDI NETO, 2014). De acordo com Martins (2005), dentre os diferentes fatores de determinação da erosividade das chuvas no Brasil, o EI_{30} tem sido amplamente utilizado por vários pesquisadores, por apresentar boa correlação com as perdas de solo.

Os valores de R mensal variam de fraco a muito forte, conforme a seguinte escala (Eletrobrás, 1988; Carvalho, 2008), com unidades em $MJ\ mm\ ha^{-1}\ h^{-1}$.

$R < 250$ – Erosividade fraca

$250 < R < 500$ – Erosividade moderada

$500 < R < 750$ – Erosividade moderada a forte

$750 < R < 1000$ – Erosividade forte

$R > 1000$ – Erosividade muito forte

Em estudos de Albuquerque *et al.* (2002), realizados no Sertão paraibano, determinaram o fator erosividade da chuva médio anual de $4.928\ MJ\ mm\ ha^{-1}\ h^{-1}$, correspondente ao período de 1983 a 1990, para o município de Sumé-PB. Corroborando com os resultados encontrados, Farinasso *et al.* (2006) estudando na região fisiográfica do Alto Parnaíba, situada na parte ocidental da região nordeste do Brasil, encontraram valores de R, para 52 estações pluviométricas, variando de 2.573 a $5.980\ MJ\ mm\ ha^{-1}\ h^{-1}$, com valor médio de $4.250,23\ MJ\ mm\ ha^{-1}\ h^{-1}$. Santos *et al.*, (2014) correlacionado erosividade ao coeficiente de chuva, encontrou valores anuais de erosividade da ordem de 2.172 a $12.950\ MJ\ mm\ ha^{-1}\ h^{-1}$ espacializados em todo o nordeste brasileiro.

3.4.2 Fator erodibilidade (Fator K)

A erodibilidade expressa a resistência do solo à ação dos agentes erosivos (chuva e escoamento superficial) e é reflexo dos atributos mineralógicos, químicos, morfológicos e físicos dos solos (PRUSKI, 2006). De acordo com Carvalho (2008) Esse fator está relacionado às propriedades físicas e químicas do solo, representando o grau de erosão de diferentes tipos de solos quando submetidos às mesmas condições de chuva, declive, manejos e praticas conservacionista.

A erodibilidade do solo pode ser dinâmica temporalmente, uma vez que as propriedades do solo, estrutura, permeabilidade, densidade, teor de matéria orgânica etc., podem ser alteradas ao longo do tempo, pelo manejo e uso do solo e as atividades agrícolas desenvolvidas (VITTE & MELLO, 2007).

De acordo com Bertoni e Lombardi Neto (2014), as propriedades do solo que influenciam na erodibilidade são aquelas que afetam a infiltração, a permeabilidade, a capacidade total de armazenamento de água e aquelas que resistem às forças de dispersão, salpico, abrasão e transporte pelo escoamento. A erodibilidade do solo é expressa como a perda de solo por unidade de índice de erosão da chuva - EI, e pode ter seu valor determinado experimentalmente em parcelas ou estimado pelos métodos indiretos, por meio de equações de regressão que contenham variáveis relacionadas às propriedades morfológicas, químicas e físicas do solo, correlacionadas com o fator K (DENARDIM, 1990). Para Silva, (2006) a erodibilidade do solo pode ser obtida basicamente, por três métodos: o primeiro baseia-se em equações de regressão que contenham como variáveis independentes propriedades químicas, físicas e morfológicas altamente correlacionadas com o fator K; o segundo envolve sua determinação em condições de campo sob chuva natural; e o terceiro, semelhante ao segundo determina o fator K em campo, em função das perdas de solo e do fator erosividade sob chuva simulada.

De acordo com Baptista (1997), esse fator pode ser determinado experimentalmente, em condições específicas de declividade e comprimento de rampa, ou de forma indireta por meio de um nomograma desenvolvido por Wischmeier *et al.*, (1971), sendo que os resultados obtidos devem ser multiplicados pelo fator de conversão 0,1317, para que possa ser utilizado no Sistema Internacional, pois em sua confecção a permeabilidade foi adotada no sistema em inglês (Foster *et al.*, 1981).

Os valores de K variam de fraco a elevado, segundo a seguinte escala (Eletrobrás, 1988; Carvalho, 2008), com unidades em $t h MJ^{-1} mm^{-1}$:

$K < 0,015$ – Erodibilidade fraca

$0,015 < K < 0,030$ – Erodibilidade média

$K > 0,030$ – Erodibilidade elevada

Albuquerque *et al.* (2002) trabalhando dados de 1983 a 1990, de um Luvisolo Hipocrômico Órtico Vértico, A fraco, textura argilosa, em Sumé, PB, obtiveram, sob chuva natural, valor do fator K de $0,013 t h MJ^{-1} mm^{-1}$. Já Bertol *et al.* (2007), trabalhando com um Nitossolo Háplico alumínico no sul do Planalto Catarinense, no período de novembro de 2001 a março de 2004, obtiveram, sob condições de chuva simulada, valores de fator K de

0,011 t h MJ⁻¹ mm⁻¹ quando calculado por meio da razão entre os valores anuais de perda de solo e do índice de erosividade das chuvas e de 0,012 t h MJ⁻¹ mm⁻¹ quando estimado por meio de regressão linear simples entre estas duas variáveis.

3.4.3 Fatores topográficos (Fator LS)

O Fator LS expressa às relações do relevo no processo de perdas de solos. O fator topográfico combina a declividade média do terreno com o comprimento de encostas (RUHOFF *et al.*, 2006). O fator comprimento e declividade da rampa (fator LS da RUSLE) representa a relação entre as perdas de solo em uma área com declive (S) e comprimento de rampa (L) quaisquer e as perdas que ocorrem na parcela padrão com uma rampa unitária com 22,1 m de comprimento e 9% de declividade (WISCHMEIER & SMITH, 1978).

De acordo com Carvalho (2008), o comprimento e a declividade de um terreno influenciam fortemente a velocidade da lâmina de escoamento superficial e, conseqüentemente na capacidade de transporte de partículas de solo pela enxurrada (erosão hídrica). Para COGO *et al.* (2003) a medida que a inclinação do declive do terreno aumenta, aumentam o volume e a velocidade da enxurrada e diminui a infiltração de água no solo, aumentando a capacidade de transporte das partículas de solo, assim como a própria capacidade de desagregar solo por ação de cisalhamento, principalmente quando concentrada nos sulcos direcionados no sentido da pendente do terreno.

Silva *et al.* (2005), estudando o conjunto de informações sobre os fatores envolvidos no processo erosivo para uma micro bacia localizado em Cunha - SP, dividiram os valores de LS encontrados em três classes de valores: classe < 1, classe = 1 e classe > 1. No caso da classe de LS < 1, o papel do relevo não é, ao menos matematicamente, acelerador, mas sim amenizador do processo erosivo. Isto porque quando são aplicados valores entre zero e 0,99 para o fator LS os resultados de perda de solo tendem a diminuir. Quando se aplica valor exatamente igual a 1 (classe =1) a participação do fator LS é nula, pois constitui o elemento neutro da multiplicação. Porém, quando valores maiores que 1 é aplicado (classe >1), verifica-se que o valor resultante (final) é ampliado, mostrando que a participação do relevo é cada vez maior na aceleração do processo de perda de solo em função do aumento do valor de LS.

3.4.4 Fator de Cobertura (Fator C)

O fator C representa a relação entre as quantidades de solo perdidas por erosão hídrica, sob determinado manejo, e as perdas desse mesmo solo quando cultivado e mantido limpo (sem cobertura). Este fator é o de mais difícil determinação em função da grande possibilidade de combinação de práticas de manejo e rotações de cultura (CARVALHO, 2008). De acordo com Bertoni & Lombardi Neto, (2014) o fator C (uso e manejo do solo) é a relação esperada entre as perdas de solo em um terreno com cobertura vegetal potencial, ou cultivado, em comparação a um terreno desprotegido. A redução da erosão vai depender do tipo da vegetação ou da cultura e manejo adotado, da quantidade de chuvas, da fase do ciclo vegetativo entre outras variáveis, cujas combinações apresentam diferentes efeitos na perda de solo.

De acordo com Albuquerque *et al.* (2002), na medida em que o manejo do solo elimina a cobertura vegetal, sua superfície fica mais exposta à ação do impacto das gotas de chuva e da enxurrada. Isto contribui para modificar as condições físicas da superfície do solo, alterando a rugosidade superficial, a porosidade e a taxa de infiltração de água no solo.

A cobertura vegetal e a rugosidade superficial é notoriamente, entre os fatores que influenciam a erosão hídrica do solo, as mais importantes, sendo responsáveis por quase toda a armazenagem de água e retenção de sedimentos da erosão na superfície do solo (BERTOL *et al.*, 2007). A cobertura do solo, proporcionada pelos resíduos culturais deixados na superfície, tem ação direta e efetiva na redução da erosão hídrica. Isto ocorre em virtude da dissipação de energia cinética das gotas da chuva, a qual diminui a desagregação das partículas de solo e o selamento superficial e aumenta a infiltração de água (COGO *et al.*, 2003).

A cobertura vegetal proporciona a diminuição da velocidade do escoamento superficial da água no solo, sendo que esta redução diretamente proporcional à quantidade de resíduos vegetais ou culturais na superfície, efeito explicado pela sinuosidade dos caminhos a serem percorridos pelo fluxo imposta pelos resíduos (ALBUQUERQUE *et al.*, 2002). O fator C tende a 1 (um) em área com solo desprotegido (ausência total de vegetação), e próximo a 0,0001 em áreas de floresta virgens (elevada densidade vegetativa) (CARVALHO, 2008).

Dentre os poucos estudos desenvolvidos no Brasil para cálculo o fator C, destacam-se os de Albuquerque *et al.* (2002) trabalhando com parcelas de perda de solo no município de Sumé-PB, que determinaram o fator cobertura vegetais (C) para áreas

cultivadas com palma morro abaixo, Caatinga nativa, Caatinga nova, Pousio com cobertura morta e palma cultivada em nível, com valores de 0,5429, 0,0014, 0,0178, 0,0128 e 0,2528, respectivamente. Bertol (2001) determinou o fator C, obtendo valores de 0,0580 e 0,2150 para a cultura do trigo e de 0,0455 e 0,1430 para a cultura da soja, nos sistemas de manejo de semeadura direta e preparo convencional, respectivamente. No Ceará, Santos *et al.* (2014) estudando perdas de solo em parcelas de erosão de 20 m² encontraram valores de 0,0167 e 0,0067 para cobertura de caatinga nativa e caatinga raleada, respectivamente.

3.4.5 Fator de Práticas Conservacionistas (Fator P)

As práticas de conservação dos solos (Fator P) também atuam nos processos erosivos e nas perdas de solos. Os valores de P variam conforme o tipo de cultura agrícola e as práticas conservacionistas adotadas na área de estudo (RUHOFF *et al.*, 2006). De acordo com Silva, (2006) o fator práticas conservacionistas representa a ação antrópica, em que considera o uso e manejo do solo e as práticas conservacionistas adotadas para a cultura implantada no terreno. Esse fator corresponde à relação entre as perdas de solo de um terreno cultivado com determinada prática conservacionista (plantio em faixas de erosão do solo, plantio em nível, cordões vegetais permanentes, terraceamento etc.) e as perdas quando se planta morro abaixo, mantendo-se as condições padrões de relevo e de uso e manejo (CARVALHO, 2008).

Albuquerque *et al.* (2005) encontraram valor do fator práticas conservacionistas (P), para a cultura da palma cultivada em nível de 0,46 em Sumé-PB. Segundo esses pesquisadores, essa prática contribuiu para reduzir em torno de 53,8% das perdas de solo, quando comparado com o cultivo morro abaixo.

3.5 Razão de aporte de sedimento

Lira, (2012) alerta para o fato de que para a USLE e suas variações possa ser aplicada em escala de bacias hidrográficas, deve-se levar em consideração o conceito de razão de aporte de sedimentos (Sediment Delivery Ratio-SDR). Modelos de erosão do solo, tais como a USLE estimam apenas a taxa de erosão bruta na escala de parcela ou lote agrícola. As taxas de erosão estimadas pela USLE são, portanto, mais elevadas do que as medidas no exutório de bacias hidrográficas. Para contemplar o efeito das deposições de sedimentos ao longo de sua trajetória, vem sendo amplamente utilizado o conceito de Razão de Aporte de Sedimentos (*Sediment Delivery Ratio* - SDR), definida como a fração da erosão bruta que é transportada a partir de uma dada área, em um determinado intervalo de tempo, até o exutório da bacia hidrográfica (SANTOS et. al, 2016).

De acordo com Silva et. al, (2009) o SDR estima a taxa de transferência de sedimentos que passa pelo exutório da bacia, usando algumas características da bacia, tais como: a distância que percorre o fluxo entre a área fonte e a saída da bacia; forma da encosta; porcentagem da cobertura vegetal no caminho percorrido pelo fluxo entre a área fonte à saída da bacia; textura do material. O SDR também pode ser calculado, sendo a razão entre a massa de sedimentos que deixa uma bacia (M_E) e a massa de sedimentos localmente erodida (M_L) (KHANBILVARDI E ROGOWSKI, 1984; ARAÚJO,2003). De acordo com Araújo, (2003) o modelo de Maner (1958) é o que apresenta melhor resultado na estimativa da Razão de aporte de sedimento nas bacias de Ceará, segundo estudo realizado em diferentes regiões do estado.

3.6 Perda de solo máxima aceitável

De acordo com Carvalho (2008), as taxas de erosão, sob determinadas circunstâncias, podem chegar a ser 100 vezes maiores com a interferência humana do que seriam considerando apenas os termos geológicos. O *United States Soil Conservation Service* (USCS) estima que as taxas de erosão geológica situam-se entre 0,20 a 2,50 t ha⁻¹ ano⁻¹, enquanto que atividades de urbanização, por exemplo, podem apresentar valores bastante elevados, como no caso da construção de estradas, 338 t ha⁻¹ ano⁻¹, e de urbanizações 226 t ha⁻¹ ano⁻¹.

Carvalho (2008) cita que, durante os anos de 1968 e 2008, cerca de 1/3 do total das terras aráveis do mundo foi permanentemente danificada pela erosão e continuava sendo, embora a uma razão de 10×10^6 ha ano⁻¹. A FAO (1967) admitia perdas da ordem de 12,5 t ha⁻¹ ano⁻¹, para solos profundos, permeáveis e bem drenados; 2 a 4 t ha⁻¹ ano⁻¹ para solos rasos ou impermeáveis e, para outros solos, admite perdas intermediárias a esses limites. Em estudos realizados em várias regiões do Nordeste do Brasil, objetivando-se avaliar as perdas de solo em parcelas mantidas continuamente descobertas e cultivadas morro abaixo, indicaram-se perdas médias anuais de solo que variaram de 27 a 94 t ha⁻¹ (SILVA *et al.*, 1989).

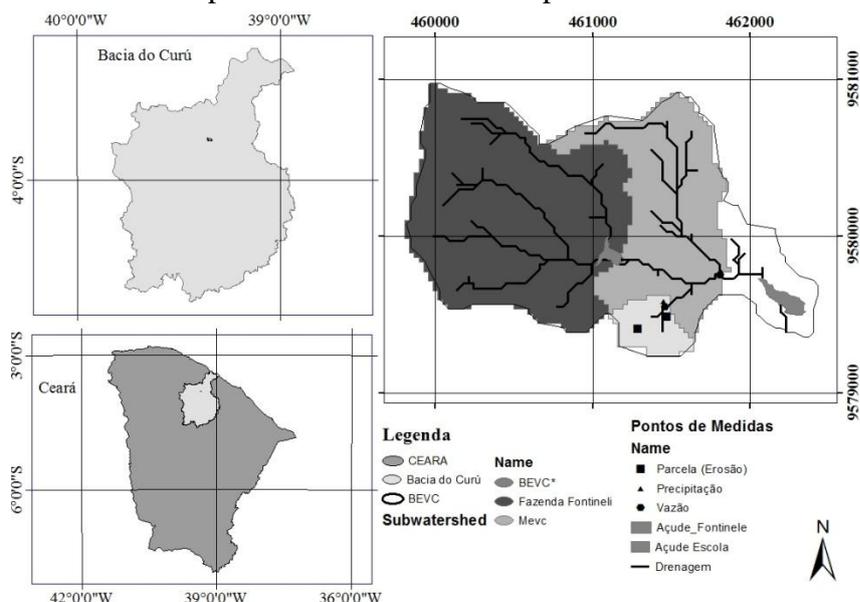
4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Caracterização da área

O estudo foi realizado em uma bacia situada na Fazenda Experimental Vale do Curú (FEVC), pertencente à Universidade Federal do Ceará, localizada na zona rural do município de Pentecoste, região semiárida do estado de Ceará (Figura 1). O município de Pentecoste está localizado geograficamente na Microrregião do Médio Curú, no Estado do Ceará, com coordenadas de 6°47'34" de latitude sul e a 39°16'13" de longitude oeste, a uma altitude média de 60 metros, aproximadamente 100 km da capital Fortaleza e o acesso se dá, primeiramente, pela BR-222 e posteriormente, pela CE-235.

A bacia em estudo é denominada Bacia Experimental Vale do Curú – BEVC. Esta compreende uma área de 284,5 ha, dividida em subunidades (Figura 1) de forma que se possa melhor monitorá-las. A subunidade Fazenda Fontineli com área de 156,3 ha possui um pequeno reservatório em seu exutório controlando aproximadamente 55% da BEVC; a área de escoamento direto da BEVC está a jusante da Fazenda Fontinele, e a montante do Açude Escola, perfazendo uma área de 100 há. Nesta área de escoamento direto está situada a Microbacia Experimental Vale do Curú – MEVC, com área de 13,8 ha.

Figura 1 – Microbacia Experimental da Fazenda Experimental Vale do Curú, UFC

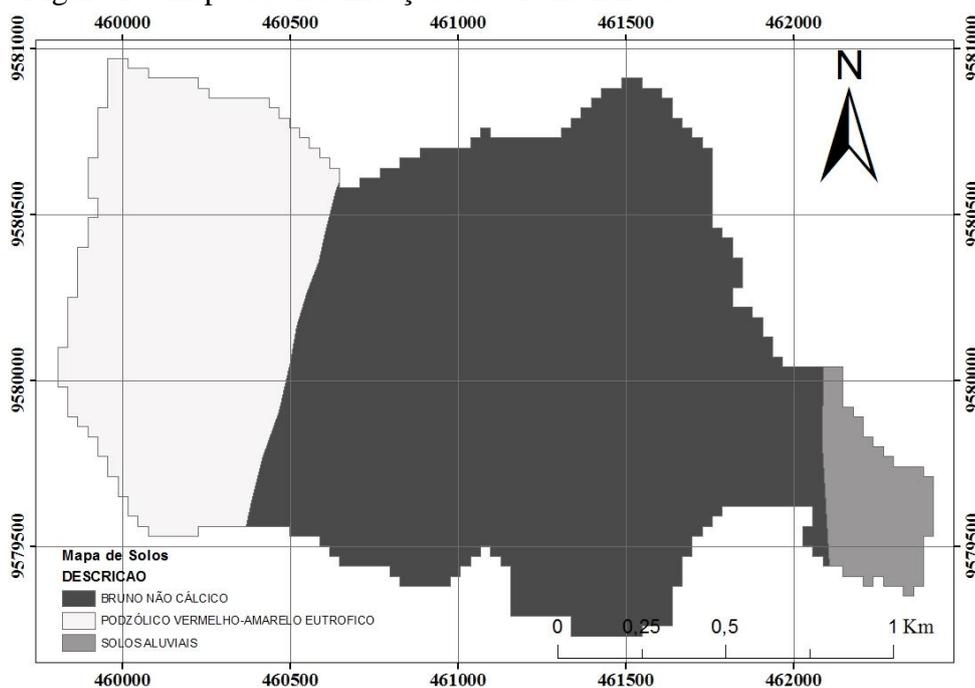


O clima da região, segundo a classificação de Köppen, é BSw'h', isto é, semiárido com chuvas irregulares, com duas estações climáticas bem definidas, com precipitação anual em torno de 800 mm, temperatura média anual de 27,1 °C e umidade relativa média do ar de 74% (EMBRAPA, 2001).

A vegetação predominante é a Caatinga, de caráter hiperxerófilo, termo que, segundo Lemos (2006), é utilizado no Nordeste brasileiro “para designar qualquer comunidade vegetal padronizada pelo seu aspecto fisionômico, resultante da caducifolia de suas espécies no período seco, assumindo caráter tropofítico e refletindo a semiaridez no chamado Polígono das Secas”. De acordo com o mapa das unidades fitoecológicas, o município de Pentecoste possui quatro diferentes tipos de vegetação, entre eles caatinga arbustiva aberta, caatinga arbustiva densa, caatinga arbórea e mata seca (LIRA, 2012).

De acordo com o Atlas de Geologia e Recursos Hídricos da CPRM, (2003), a bacia experimental está inserida em rochas do embasamento cristalino e aluviões, representativos de duas unidades litológicas, referentes aos períodos pré-cambriano e quaternário. De acordo com o mapa base de Reconhecimento dos Solos do Ceará na escala de 1:600.000, que contém as classes de solo para todo o Estado, identificaram-se três diferentes tipos de solo dentro da bacia. Sendo eles bruno não cálcico; podzólico vermelho-amarelo eutrófico e solos aluviais (Figura 2).

Figura 2 – mapa de classificação de solo na BEVC



4.2 Monitoramento da área

A bacia experimental está instrumentada de maneira a atender as necessidades do monitoramento das variáveis hidrossedimentológicas nas diferentes escalas de estudo. As quais estão apresentadas na Tabela 1

Tabela 1 – Descrição da instrumentação de monitoramento da BEVC

Tipo de dado	Local de instalação	Equipamento	Frequência	Tempo de observação
Precipitação	MEVC	Pluviômetro Ville de Paris	Diária	Desde 2015
	BEVC	Pluviômetro Ville de Paris	Diária	Desde 2015
	BEVC	Pluviógrafo de balança	5 min	
Vazão	MEVC	Vertedouro misto	5 min	Desde 2015
	BEVC	Vertedouro triangular	5 min	Desde 2015
Nível d'água	MEVC	Sensor HOBO	5 min	Desde 2015
	BEVC	Sensor HOBO	5 min	Desde 2015
	Açude Escola	Réguas limimétricas	Diária	Desde 2015
Concentração de sedimento	MEVC	Amostrador DH-48	Evento	Desde 2015
	BEVC	Amostrador DH-48	Evento	Desde 2015
	Parcelas (Wischmeier)		Evento	Desde 2015

4.2.1 Precipitação

Os dados pluviométricos na BEVC foram obtidos em uma estação pluviométrica automatizada instalada na área de estudo, que contém um pluviógrafo de Balança, com aquisição de dados a cada 5 minutos e dois pluviômetros *ville de paris* (Figura 3). Também contará com dados de uma estação meteorológica que funciona na FEVC pertencente a Universidade Federal do Ceará – UFC.

Figura 3– instrumentos de aquisição de dados de precipitação pluviométrica



4.2.2 Escoamento superficial

O escoamento superficial foi monitorado por meio de duas estações hidrossedimentológicas: uma instalada no exutório da MEVC (Figura – 4a) e outra a montante do Açude escola (Figura – 4b). O escoamento superficial foi quantificado por meio dos vertedouros, sendo esse confeccionado em alvenaria (Figura 4).

Figura 4– Vertedouros para medida do volume escoado na MEVC (a) e na BEVC (b)



A vazão foi calculada por meio da curva chave definida para cada um dos vertedouros instalado nas seções. O monitoramento do nível de água escoado na seção foi realizado com a utilização de sensores de nível da marca HOBBO Water Level Logger, programados para fazerem leituras em intervalos de 5 minutos e instalados em um poço tranquilizador, ligado ao vertedouro por um vaso comunicante construído para esse fim. Para o cálculo de vazão no vertedouro 1 (Figura 4a), foram utilizadas duas equações: uma para parte triangular (que mede as vazões menores, Equação 1) e outra para a retangular (quando

o nível de água ultrapassa a soleira do vertedouro triangular $> 0,15\text{m}$, Equação 2). No caso do vertedouro da Figura 2b, utilizou-se a Equação 3.

$$Q = Cd_t \cdot H^{\frac{5}{2}} \quad (1)$$

$$Q = Cd_t \cdot H^{\frac{5}{2}} + Cd_r \cdot (L - 0,2 \cdot (H - 0,15)) \cdot (H - 0,15)^{\frac{3}{2}} \quad (2)$$

$$Q = \frac{8}{15} \cdot \sqrt{2g} \cdot \text{tg}\left(\frac{\phi}{2}\right) \cdot H^{\frac{5}{2}} \quad (3)$$

Sendo:

Q = a vazão escoada, ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$);

L = a largura do vertedouro;

H = a altura de água passando no vertedouro;

Cd_t = coeficiente de descarga do vertedouro triangular;

Cd_r = coeficiente de descarga do vertedouro retangular.

ϕ = ângulo de abertura do vertedouro triangular grande

4.2.3 Parcelas experimentais

A área conta com duas parcelas de erosão para quantificação da perda de água e solo em escala de lote, com dimensões de 4 x 22 m, construídos no contexto desta pesquisa de mestrado. A cobertura vegetal das parcelas estudadas é composta por uma vegetação de Caatinga com oito anos de pousio na Parcela P08 e, na Parcela P40, uma Caatinga preservada com 40 anos de pousio. A declividade média das parcelas, determinada com auxílio de um nível de mangueira, é de 8,9% e de 9,7% para P08 e P40, respectivamente. Na Figura 5 pode se observar as características das parcelas.

Figura 5 – Parcelas de erosão (Wischmeier) no período seco: parcelas P08 (a) e P40 (b); e no período chuvoso: parcelas P08 (c) e P40(d).



Os valores de escoamento superficial e de erosão foram quantificados em parcelas experimental de perdas de solo e água (Wischmeier) com área igual a 88 m^2 ($4 \times 22 \text{ m}$), com o comprimento maior obedecendo ao sentido da declividade. A parcela foi contornada com chapa de aço galvanizada com $0,30 \text{ m}$ de largura, que foi enterrada a $0,15 \text{ m}$ (Figura 5). A parte inferior da parcela foi conectada a um sistema coletor, constituído de 3 tanques com capacidade de 25, 200 e 200 L, respectivamente. O primeiro tanque (Figura 6a) é composto de um sistema de 7 janelas. Após o enchimento do primeiro tanque, $1/7$ do escoamento superficial da parcela é canalizado para o segundo tanque, que uma vez cheio, o excedente é conduzido para o terceiro tanque (Figura 6b).

Figura 6– Coletores de água e sedimento



4.3 Medidas de perda de solo

4.3.1 Parcelas experimentais

As coletas ocorreram entre os meses de janeiro e maio, nos anos de 2015 e 2016, correspondendo à estação chuvosa da região. As coletas para quantificação do volume escoado superficialmente e de amostras para determinação da perda de sedimentos foram realizadas a cada evento de chuva erosiva (que geraram escoamento superficial), no acumulado de 24 horas.

As amostras de água e sedimentos foram extraídas do primeiro tanque coletor, após o evento de chuva gerador do escoamento. As amostras foram previamente homogeneizadas e coletadas utilizando garrafas plásticas de 1000 ml de capacidade, devidamente identificadas.

4.3.2 Microbacia

Para medição da perda de solo na microbacia, foram coletadas amostras de água com sedimentos na seção de medição de vazão após cada evento gerador de escoamento, para determinação da concentração de sedimentos careados.

As amostras de água coletadas após eventos geradores de escoamento superficial, tanto das parcelas experimentais, quanto da microbacia foram conduzidas ao Laboratório de Água, do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará

(IFCE)-Campus MARACANAÚ para determinação dos parâmetros físicos. As análises de sólidos totais foram realizadas conforme metodologia descrita por CARVALHO (2008).

4.4 Estimativas de perda de solo

4.4.1 Parcelas Experimentais

Além das medidas de perda de solo, também foi realizada a estimativa de perda solo usando a Equação Universal de Perda de Solo Revisada - RUSLE, conforme descrito por Santos (2009). Isso é necessário para a avaliação dos parâmetros do modelo. A erosão localizada nas parcelas será estimada usando a equação 4.

$$PS = R \cdot K \cdot L \cdot S \cdot C \cdot P \quad (4)$$

Em que:

PS = perda média anual de solo, ton ha⁻¹;

R = fator de erosividade da chuva, MJ mm ha⁻¹ h⁻¹;

K = fator de erodibilidade do solo, ton h MJ⁻¹ mm⁻¹;

L = fator topográfico que expressa o comprimento de encosta, adimensional;

S = fator topográfico que expressa o declividade de encosta, adimensional;

C = fator de uso e manejo do solo, adimensional; e;

P = fator de práticas conservacionista, adimensional.

Erosividade (EI30) da chuva (fator R)

De posse dos dados de precipitação, foram calculadas as intensidades (I) de cada evento, em mm h⁻¹, além da máxima intensidade em trinta minutos, I₃₀ em mm h⁻¹. A energia cinética (EC) associada à chuva, em MJ ha⁻¹ mm⁻¹, foi obtida pela equação proposta por Wischmeier e Smith (1958) modificada por Foster *et al.* (1981); e sugerida por Medeiros e Araújo (2014):

$$EC = 0,119 + 0,0873 \cdot \log I \quad (5)$$

Em que:

EC = energia cinética das gotas da chuva (MJ ha⁻¹ mm⁻¹);

I = intensidade da chuva (mm h⁻¹).

Os valores calculados através da equação (5) foram utilizados para o cálculo do índice de erosividade EI_{30} , obtido a partir da multiplicação da energia cinética total (EC) de uma chuva erosiva pela máxima intensidade ocorrida em um período de 30 minutos consecutivos (I_{30} máximo) (Equação 6). O índice de erosividade das chuvas EI_{30} é o produto da energia cinética do evento de chuva e o máximo 30 min intensidade (I_{30} em mm h^{-1}) durante o respectivo evento.

$$EI_{30} = EC \cdot I_{30} \cdot P \quad (6)$$

Em que:

EI_{30} = índice de erosividade ($\text{MJ mm ha}^{-1} \text{h}^{-1}$);

I_{30} = intensidade máxima em 30 minutos (mm h^{-1});

P = altura total de precipitação (mm)

Erodibilidade do Solo (Fator K)

O fator K foi calculado com base na equação (7), utilizada na construção do nomograma de Wischimeier e Smith 1978 (PRUSKI, 2006):

$$K = \frac{(2,1 \cdot 10^{-4} \cdot (12 - MO) \cdot M^{1,14} + 3,25 \cdot (S - 2) + 2,5 \cdot (p - 3))}{100} \cdot 0,1318 \quad (7)$$

Em que:

K = erodibilidade do solo ($\text{t h MJ}^{-1} \text{mm}^{-1}$);

MO = conteúdo de matéria orgânica, em %;

M = parâmetro que representa a textura do solo;

S = classe de estrutura do solo, adimensional; e;

p = permeabilidade do perfil, adimensional.

O valor de M é determinado pela equação 6;

$$M = (\% \text{silte} + \% \text{areiafina}) \cdot (100 - \% \text{argila}) \quad (8)$$

Tabela 2 – Valores de S usados na equação de determinação do fator K

Classe Estrutural	S
Granular muito fina; quando argila + silte > 50%	1
Granular fina; quando argila + silte + areia fina > 50%	2
Granular média a grossa; quando argila + silte + areias > 50%	3
Blocos, laminar ou maciça. quando pedregulho > 50%	4

Tabela 3– Valores de P usados na equação de determinação do fator K

Classe de Permeabilidade	P
Rápida	1
Moderada para rápida	2
Moderada	3
Lenta para moderada	4
Lenta	5
Muito lenta	6

As amostras foram coletadas em áreas adjacentes às parcelas para caracterização da erodibilidade do solo correspondente.

Fator Topográfico (Fator LS)

Os valores dos fatores topográficos (L e S), por sua vez, foram calculados com base na equação proposta por Wischmeier & Smith (1978):

$$LS = \left(\frac{\sqrt{L}}{100} \right) \cdot (1,36 + 0,97 \cdot S + 0,1385 \cdot S^2) \quad (9)$$

Em que:

L = o comprimento da parcela em m

S = a declividade expressa em %.

Fator Cobertura Vegetal e Prática Conservacionista (Fator CP)

No presente estudo o fator C foi determinado indiretamente para a cobertura de caatinga preservada (com 40 anos de pousio) e raleada (com 8 anos de pousio), a partir da medição e controle das outras variáveis da RUSLE. No caso do fato de conservação e prática conservacionista admitiu-se o valor de 1, considerando a inexistência de qualquer ação de minimização dos processos erosivos. De posse dos valores de perda de solo (PS), determinados diretamente em campo na parcela de erosão, e dos demais fatores da equação universal da perda de solo (fator R, K, e LS), o fator C foi calculado indiretamente pela equação 10, que foi obtida a partir da USLE:

$$C = \frac{PS}{R \cdot K \cdot LS \cdot P} \cdot A_p \quad (10)$$

Em que:

A_p = área da parcela em ha.

4.4.2 Estimativa da produção de sedimentos na BEVC e MEVC

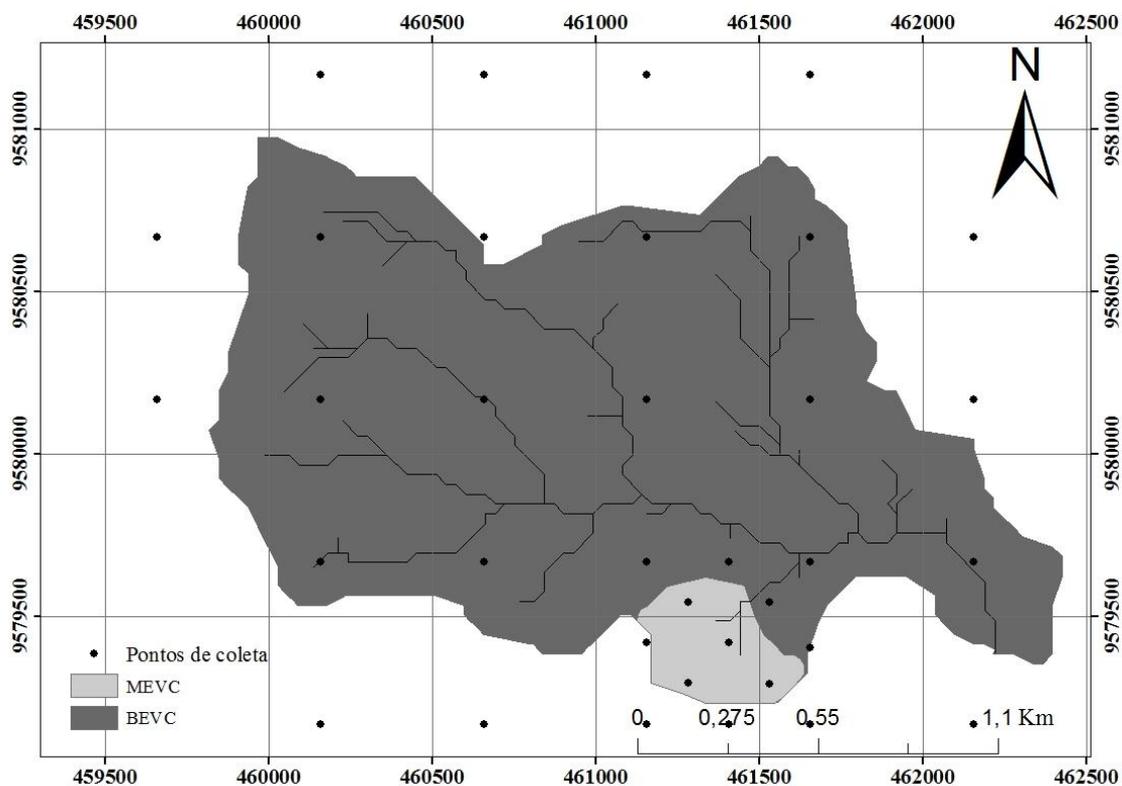
Erosividade (R)

A erosividade foi determinada para cada um dos seis eventos de chuvas registrados na BEVC seguindo o descrito na escala de parcela e especializado de forma homogênea em toda a bacia, já que não se dispunha de postos pluviométricos no entorno da bacia com maior representatividade. Com auxílio de ferramentas de geoprocessamento foi atribuído o valor de erosividade calculado no posto pluviométrico inserido na bacia.

Erodibilidade (K)

A estimativa de erodibilidade seguiu o mesmo modelo descrito nas parcelas. Foram realizadas coletas em uma grade com total de 36 pontos sendo 13 na MEVC e 23 na BEVC (Figura 7), espacialmente distribuídos nestas bacias experimentais e garantido a coleta em pontos que extrapolam o limite do divisor, em uma malha uniforme e com densidade representativa. Depois de estimado os valores individuais do fator K para cada ponto, foi gerado um mapa de erodibilidade do solo usando ferramentas de interpolação em ambiente de SIG.

Figura 7 – Distribuição espacial dos pontos de coleta para determinação de erodibilidade do solo.



Após a definidos os pontos de coleta de solo, foram realizadas coletas de amostras do tipo indeformada utilizando o amostrador do tipo Uhland, na profundidade de 0 a 20 cm, para determinação da permeabilidade do solo; e amostras deformadas com auxílio de uma enxada, também na profundidade de 0 a 20 cm (Figura 8), para análise de granulometria e matéria orgânica. As amostras foram acondicionadas em sacos plásticos e levadas ao Laboratório de Mecânica dos Solos e Pavimentação da Universidade Federal do Ceará (UFC), onde os ensaios foram conduzidos.

Figura 8 – Coletor de amostras indeformadas (a), cravação do amostrador com cilindro (b) e coleta do material para análise granulométrica e retirada do cilindro (c)



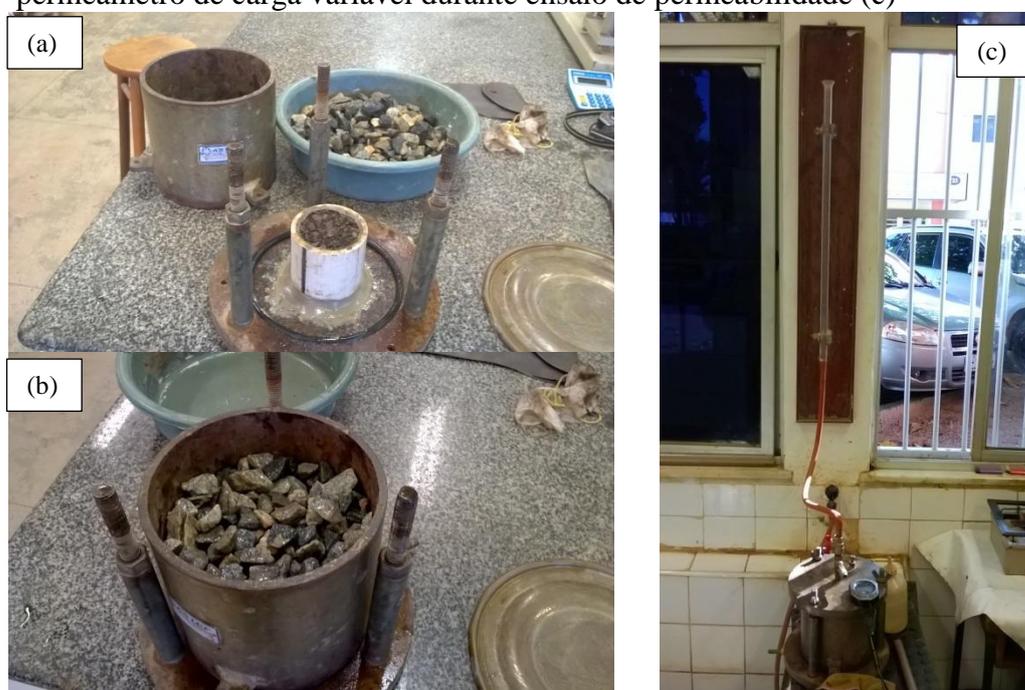
As amostras para a análise granulométrica foram preparadas de acordo com a NBR6457, que dispõe sobre o preparo de amostras para compactação e ensaios de caracterização. O ensaio para determinação da curva granulométrica dos solos foi realizado de acordo com os procedimentos recomendados pela norma NBR7181, sendo este procedimento constituído de duas etapas: o peneiramento dos grãos com diâmetro equivalente maior que 0,075 mm; e a sedimentação das partículas menores que 2,0 mm, (Figura 9). Nesta metodologia, a fase de sedimentação é realizada após a desfloculação química e mecânica das partículas.

Figura 9 – Amostras secando ao ar (a), quarteamento das amostras (b), ensaio de peneiramento (c) e ensaio de sedimentação (d).



A permeabilidade do solo foi determinada com amostras indeformadas de acordo com o método “A” da NBR14545 de 2000, que dispõe sobre a determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos a carga variável (Figura 10).

Figura 10 – Preparação para ensaio de permeabilidade (a), amostra preparada (b), permeômetro de carga variável durante ensaio de permeabilidade (c)



A permeabilidade de cada amostra de solo foi calculada de acordo com a Equação 11

$$k = \frac{a \cdot H}{A \cdot \Delta t} \cdot \ln\left(\frac{h_1}{h_2}\right) \quad (11)$$

Em que:

k = coeficiente de permeabilidade expresso em cm s^{-1}

Δt = diferença entre os instantes t_1 e t_2 em s;

h_1 = carga hidráulica no instante t_1 em cm;

h_2 = carga hidráulica no instante t_2 em cm;

a = área interna da bureta de vidro em cm^2 ;

H = altura inicial do corpo de prova em cm;

A = área inicial do corpo de prova em cm^2

O teor de matéria orgânica foi determinado conforme a metodologia da NBR13600 de 1996, a qual prescreve o método para determinação do teor de matéria orgânica de solos por meio da queima em mufla, à temperatura de 440 ± 5 °C, do material previamente seco em estufa à 105 °C.

Fator topográfico (LS)

O fator LS foi obtido por meio de um modelo digital de elevação (SRTM - *Shuttle Radar Topography Mission*) com resolução espacial de 30 m, disponíveis na rede mundial de computadores diretamente do endereço: <https://earthexplorer.usgs.gov>. O mesmo foi utilizado para a confecção dos vetores de delimitação da bacia que se fazem necessários para o cálculo do Fator LS e espacialização dos demais fatores.

Para se chegar ao valor de fator L (comprimento de rampa) foi utilizado o conceito de retângulo equivalente proposto por Fernandes, (2000) adaptado para automatização com as ferramentas de SIG.

A adaptação consiste de utilizar, ao invés de quadriculas de tamanho conhecido, áreas de contribuição de fluxo (*catchment*) delimitadas automaticamente, usando um quantitativo limite de 25 células acumuladas (*threshold*) no processo prévio de geração da rede de drenagem. Assim, calcula-se a área e comprimento máximo das microbacias geradas para estimativa do comprimento de rampa correspondente, conforme Equação 12.

$$\lambda = \frac{A}{4 \cdot L_t} \quad (12)$$

Em que:

λ = comprimento de rampa médio na microbacia;

A = a área de contribuição de fluxo da microbacia (m²);

L_t = ao comprimento máximo de cada área de contribuição de fluxo da microbacia (m).

O fator S foi gerado com base em um arquivo raster de declividade da bacia, também gerado a partir do modelo digital de elevação (SRTM - *Shuttle Radar Topography Mission*) por meio da equação sugerida por Bizuwerk *et al.* (2008).

$$S = 0,065 + 0,045 \cdot D + 0,0065 \cdot D^2 \quad (13)$$

Em que:

S= fator S;

D = declividade em (%)

O fator LS foi determinado através da Equação citada por Carvalho (2008):

$$LS = 0,00984 \cdot \lambda^{0,63} \cdot S^{1,18} \quad (14)$$

Em que:

LS = fator topográfico;

λ = comprimento de rampa médio na microbacia;

S= fator S

Fator (C e P)

Os valores de C foram calibrados com uso das parcelas de erosão e o fator P foi admitido como sendo 1, devido ao fato de não se constatar nenhuma pratica conservacionista na área. Os valores do fator C para os demais usos foram obtidos da Literatura (REINING, (1992); ARAÚJO, (2003)) Em seguida foi gerado um mapa utilizando técnicas de geoprocessamento para espacialização dos valores de C dos diferentes usos do solo identificados na bacia por meio de visitas a área e com auxílio de imagens de satélite, conforme levantamento realizado em campo com auxílio de GPS portátil.

Produção de sedimento e razão de aporte de sedimento

A estimativa da perda de solo na bacia foi realizada através do uso da Equação Universal de Perda de Solo Revisada – RUSLE, associada à Razão de Aporte de Sedimentos - SDR. Dessa forma, a quantidade de sedimento produzido na microbacia hidrográfica será estimada a partir da equação 15.

$$E_s = PS \cdot SDR \cdot A_b \quad (15)$$

Em que:

E_s = Produção de sedimento (ton);

PS = Massa erodida localmente na bacia por unidade de área (ton ha^{-1});

SDR = Fração percentual de sedimento erodido que consegue atingir a rede de drenagem.

A_b = Área da bacia

O SDR foi estimado a partir da equação de Maner, sugerida por Araújo (2003), (Equação 16), que considera fundamentalmente o efeito da declividade do terreno no transporte difuso e é dada por:

$$\text{Log}(\text{SDR } \%) = 2,943 - 0,824 \cdot \log\left(\frac{L_m}{F_r}\right) \quad (16)$$

Em que:

L_m = comprimento máximo da bacia, em linha reta, medido paralelamente ao rio principal em metros;

F_r = diferença entre a cota média do divisor de água e a cota do exutório em metros.

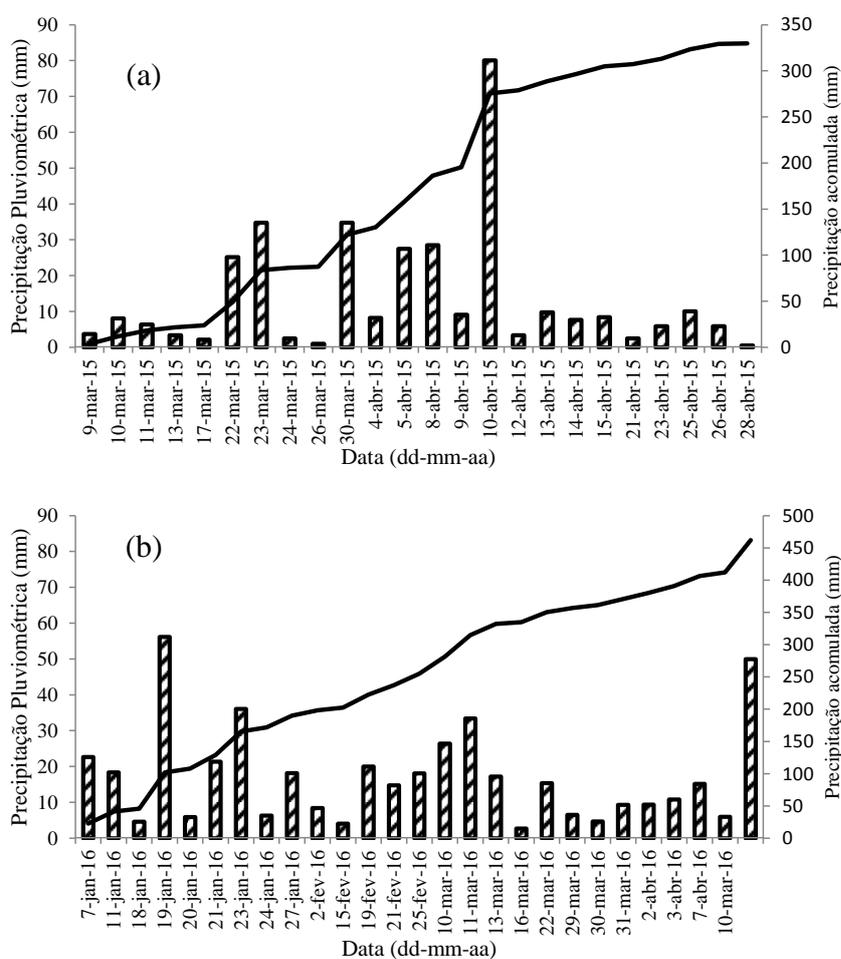
O SDR também foi estimado a partir da relação entre a produção de sedimentos observada e a erosão estimada pela RUSLE adaptando-se a equação 15.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Dinâmica dos processos hidrossedimentológicos nas parcelas

A precipitação pluviométrica para os anos de 2015 e 2016 foi de 329,70 mm e de 462,20 mm, respectivamente (Figura 11), ficando bem a baixo da média histórica da região que corresponde a 800 mm. O total precipitado de 2015 foi resultado de 24 eventos, sendo o de maior magnitude com 80,1 mm e o de menor 0,5 mm, enquanto que para o ano de 2016, ocorreram 27 eventos, sendo a maior altura pluviométrica registrada de 56,2 mm e a menor de 2,7 mm. A Tabela 4 sumariza os eventos de precipitação e escoamento superficial observados nas duas parcelas nos anos de 2015 e 2016.

Figura 11 – Precipitação pluviométrica acumulada de 24 horas, 2015(a), 2016 (b)



Do total de 24 eventos pluviométricos de 2015, apenas 8 deles geraram escoamento superficial nas parcelas de erosão (Figura 12a), perfazendo um volume total

escoado de 1396 L na Parcela P08 (com 8 anos de pousio), com máximo de 939L e mínimo de 5L. Já na parcela P40 (com 40 anos de pousio), foi escoado um volume total de apenas 722,5 L (48% menor que na P08), com mínimo de 2,5L e máximo de 644L.

No ano de 2016, apesar de apresentar maior total precipitado e maior número de eventos pluviométricos quando comparado com 2015 (Figura 11), somente 5 eventos geraram escoamento nas parcelas (Figura 12b), sendo que o volume escoado foi muito menor do que em 2015 para as duas parcelas. A parcela P 08 novamente apresentou valores de escoamento superior aos da parcela P 40 (Figura 12b). Os valores de escoamento total foram de apenas 279 L para P08 e de 100L para P40, valores de apenas 20% e 13,80% do volume escoado no ano anterior, respectivamente. Em estudos realizado em Sumé, PB, foram encontrados valores médios de escoamento de 2250 L anuais em parcelas com cobertura de caatinga nativa preservada, e constataram que a mudança de uso aumentou em até 10 vezes esse valor (ALBUQUERQUE et. al 2002).

Figura 12 – Escoamento nas parcelas de erosão para ano de 2015 (a), e 2016 (b)

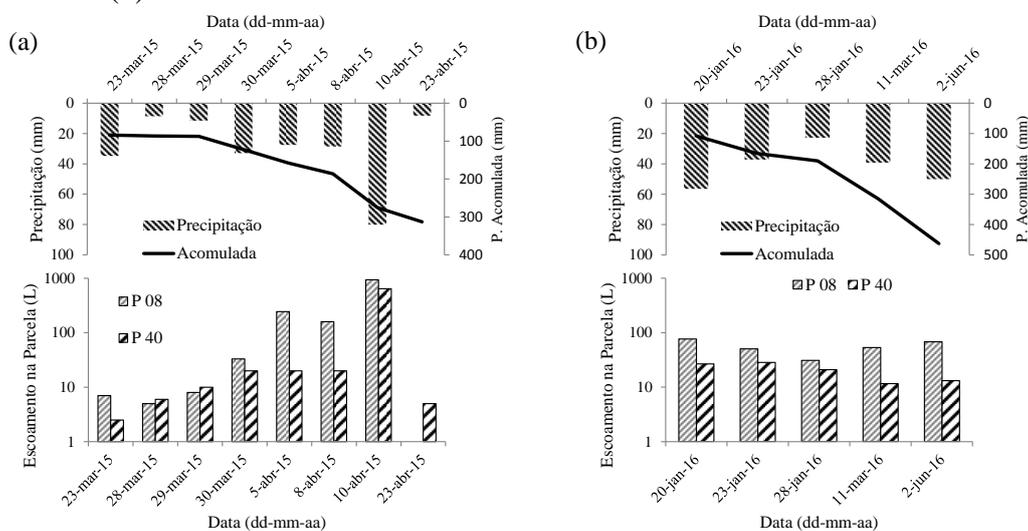


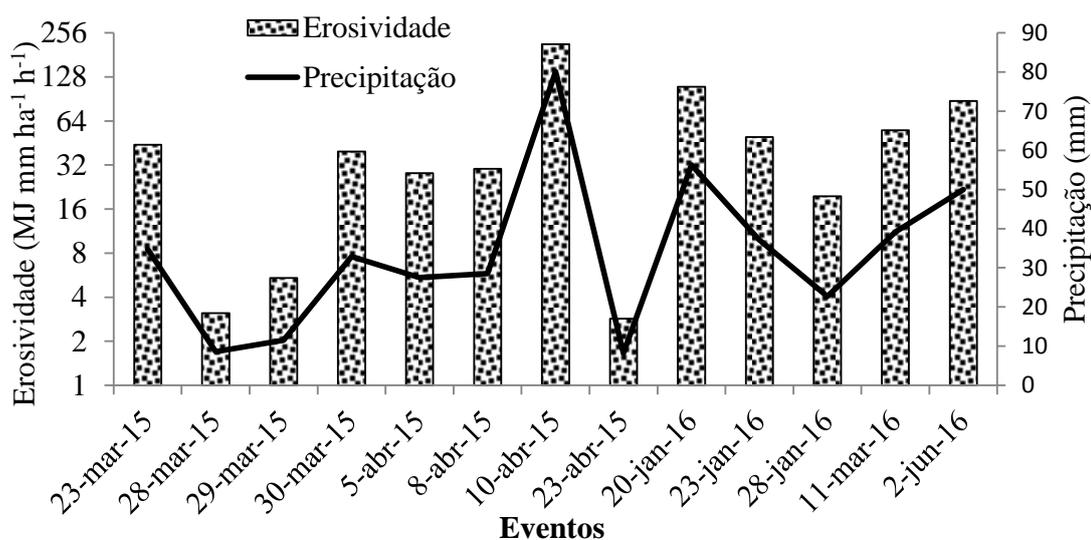
Tabela 4 – Síntese dos processos hidrológicos nas parcelas para os anos de 2015 e 2016

Ano	Parcela	Nº de eventos de chuva	Nº de eventos de escoamento	Precipitação total (mm)	Precipitação Efetiva (mm)	C (%)
2015	P08	24	8	329,7	15,9	4,8
	P40	24	8	329,7	8,3	2,5
2016	P08	27	5	462,2	3,2	0,7
	P40	27	5	462,2	1,1	0,2
Total	P08	51	13	791,9	19,1	2,4
	P40	51	13	791,9	9,4	1,2

Pode-se perceber, ainda, da Tabela 4 que em 2015 apenas 30% dos eventos chuvosos nas parcelas P08 e P40 resultaram em escoamento, com coeficientes de escoamentos baixos com valores de 4,8% e 2,5%, respectivamente. No ano de 2016, apesar de ter sido um ano mais úmido, com precipitações totais 40% superiores, apenas 19% dos eventos geraram escoamento, com coeficientes de escoamento bem inferiores, correspondendo a 0,7% e 0,2% para as parcelas P08 e P40, respectivamente.

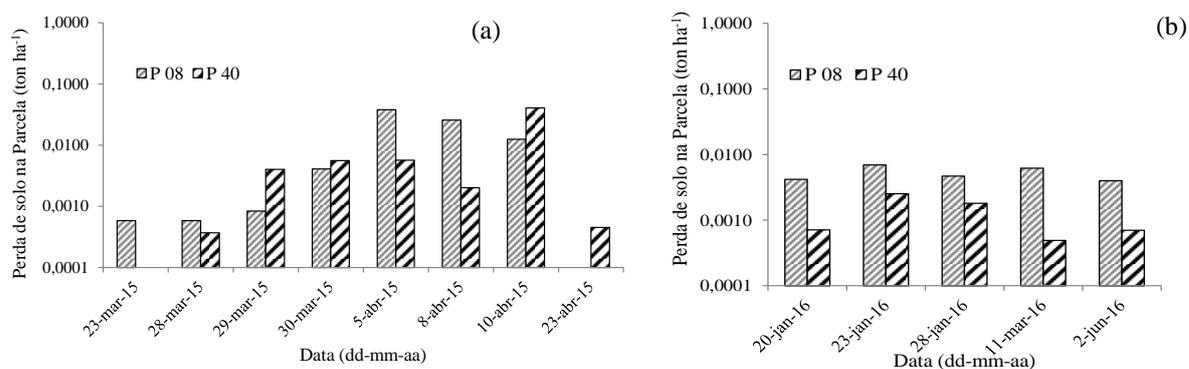
Os 13 eventos que geraram escoamento e, conseqüentemente, perda de solo nas parcelas apresentaram erosividade variando de 3 a 215 $\text{MJ mm}^{-1} \text{ha}^{-1} \text{h}^{-1}$ (Figura 13), sendo a erosividade máxima observada no mês de abril de 2015, considerada moderada. Nos demais eventos, a erosividade foi fraca segundo a classificação apresentada por Carvalho (2008).

Figura 13– Erosividade das chuvas que geraram escoamento superficial



Os 8 eventos de 2015 geradores de escoamento nas parcelas apresentaram taxas de perda de solo variando de 0,0006 ton ha⁻¹ a 0,0380 ton ha⁻¹ na parcela P08 e de 0,0004 a 0,0406 ton ha⁻¹ (Figura 14a). Enquanto no ano de 2016 as perdas de solo variaram da ordem de 0,0040 a 0,0070 ton ha⁻¹ para parcela P 08 e de 0,0004 a 0,0025 ton ha⁻¹ para parcela P 40. Albuquerque et. al, (2005) em estudo semelhante realizado no semiárido paraibano encontrou taxas médias de 0,10 ton ha⁻¹ e de 0,41 ton ha⁻¹ para caatinga nativa e caatinga nova (rebrotada), respectivamente. As taxa de perda de solo inferiores as do autor supracitado pode esta relacionado ao fato de que houve poucos eventos de escoamento ou até mesmo pelo fato desses eventos não ter capacidade de transportar todo material erodido.

Figura 13 – Perda de solo nas parcelas com diferentes períodos de pousio, para o ano de 2015 (a) e para 2016 (b)



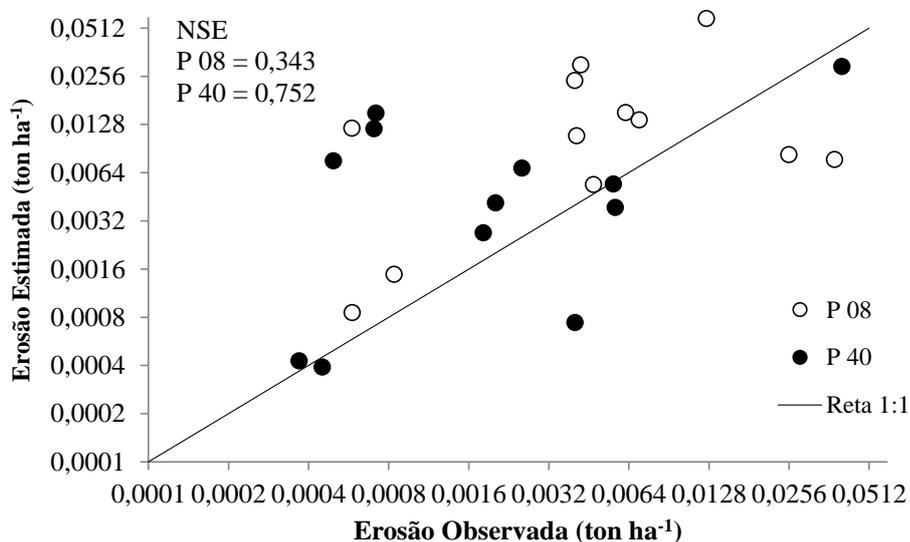
Na Tabela 5 são apresentados os fatores da Rusle para cada uma das parcelas em estudo, acompanhados das taxas de perda de solo medidas de cada evento. Neste estudo, o fator C de cada uso foi estimado de forma indireta com base nas medições das demais variáveis da RUSLE. Assim, foram encontrados valores médios de 0,0126 para caatinga raleada presente na Parcela P08 (8 anos de pousio) e de 0,0061 para caatinga nativa com ocorrência na Parcela P40 (40 anos de pousio). Albuquerque et.al (2005), estudando o mesmo bioma, na região de Sumé, PB encontrou valores de 0,0174 e de 0,0014 para caatinga nova e caatinga nativa respectivamente. Enquanto SANTOS *et al*, (2014) em estudo semelhante no município de Iguatu, CE obteve valores de 0,0067 para caatinga raleada e de 0,0167 para caatinga nativa, mostrando a heterogeneidade dos valores do Fator C dentro do mesmo bioma e sujeitos a estados de conservação distintos.

Tabela 5 – Fatores da Equação Universal de Perda de Solo Revisada - Rusle , taxas de perda de solo e valores indiretos de fator C para as parcelas de erosão

Data	Fator R	Fator K		Fator LS		Erosão observada		Fator C	
	MJ mm ha ⁻¹ h ⁻¹	ton h MJ ⁻¹ mm ⁻¹				ton ha ⁻¹			
		P 08	P 40	P 08	P 40	P 08	P 40	P 08	P 40
23-mar-15	44					0,0006		0,0006	-
28-mar-15	3					0,0006	0,0004	0,0086	0,0053
29-mar-15	5					0,0008	0,0040	0,0071	0,0329
30-mar-15	40					0,0041	0,0056	0,0047	0,0063
5-abr-15	28					0,0380	0,0057	0,0617	0,0089
8-abr-15	30					0,0256	0,0020	0,0388	0,0030
10-abr-15	215	0,0221	0,0202	0,9833	1,1163	0,0125	0,0405	0,0027	0,0084
23-abr-15	3					-	0,0005	-	0,0070
20-jan-16	110					0,0042	0,0007	0,0018	0,0003
23-jan-16	50					0,0070	0,0025	0,0064	0,0023
28-jan-16	20					0,0047	0,0018	0,0110	0,0041
11-mar-16	55					0,0062	0,0005	0,0052	0,0004
2-jun-16	88					0,0040	0,0007	0,0021	0,0004
Mínimo	3					0,0006	0,0004	0,0006	0,0003
Máximo	215	-	-	-	-	0,0380	0,0405	0,0617	0,0329
Média	53					0,0090	0,0054	0,0126	0,0061

Os valores de fator C encontrados para a caatinga raleada (Parcela P08) e para a caatinga conservada (Parcela P40) foram aplicados aos eventos erosivos como forma de validação. Os resultados da estimativa apresentaram superestimativa em relação aos valores medidos, com valores de C apresentando o coeficiente de Nash e Sutcliffe -NSE de 0,343 e 0,752 para as parcelas P 08 e P40 respectivamente (Figura 15), considerado aceitável para a parcela P 08 e bom para P 40. Santos *et al.*, (2014) encontraram superestimativas de perdas de solo de até 34,3%.

Figura 14– Erosão observada nas parcelas versus erosão estimada usando o fator C calibrado



5.2 Dinâmica dos processos hidrossedimentológicos nas bacias experimentais

Durante os dois anos de monitoramento na área experimental, apenas em 2015 foram registrados eventos de escoamento, em ambas as bacias de controle (BEVC e MEVC), concentrados no mês de abril daquele ano. Na Tabela 5 são apresentados os volumes escoados para cada um dos 4 eventos de escoamento e as respectivas concentrações de sedimentos, observados na BEVC. Entretanto, apenas dois desses eventos ocorreram também na microbacia experimental (MEVC), o que pode ser explicado pelo melhor estado de conservação desta bacia em relação à parte mais ao norte da área de contribuição direta a seção de controle da BEVC.

Tabela 6 – Eventos de escoamento superficial nas unidades e estudo e suas respectivas concentrações de sólidos.

Data	Volume escoado (L)	Sólidos Totais mg L ⁻¹
MEVC		
10-abr-15	2.509.115	231,33
13-abr-15	8.180	201,67
BEVC		
8-abr-15	1.253.052	928,00
10-abr-15	12.121.000	679,33
13-abr-15	1.131.000	480,00
14-abr-15	1.857.000	339,67

Na Tabela 7 são apresentados os dados provenientes do monitoramento das duas unidades de estudo. O coeficiente médio de escoamento das unidades em estudo foi de 13,08% ficando bem acima da média observada por Araújo Neto *et al.*, (2015) que foi de de 3,8% para uma microbacia com caatinga e de 9,5% quando a mesma área teve sua vegetação alterada. Tal fato pode ter ocorrido devido a concentração das chuvas geradoras de escoamento em um único mês. Outro fato que pode ter contribuído pra esta ocorrência e que tanto a MEVC quanto BEVC apresenta diferentes tipos de cobertura, em diferentes graus de conservação. Autores como Muñoz-Robles *et al.* (2011), Vaezi (2014); Araújo Neto *et al.*, (2015) defendem que a cobertura vegetal é um fator chave sobre o processo de escoamento, importância da vegetação sobre o deflúvio em bacias hidrográficas.

Tabela 7 – Síntese hidrossedimentológica das microbacias em estudo.

Data	Precipitação mm	Erosividade MJ mm h ⁻¹ ha ⁻¹	Escoamento mm	PS Observada ton/ha	C runoff %
MEVC					
10-abr-15	80,10	215	18,18	0,580	22,70
13-abr-15	9,80	4	0,06	0,002	0,60
BEVC					
8-abr-15	28,50	30	1,25	0,116	4,40
10-abr-15	80,10	215	12,12	0,823	15,13
13-abr-15	9,80	4	1,13	0,054	11,54
14-abr-15	7,70	3	1,86	0,063	24,12
Mínimo	7,70	3	0,06	0,002	0,60
Máximo	80,10	215	18,18	0,823	24,12
Média	31,53	63	5,77	0,273	13,08

As perdas de solo das unidades foram da ordem de 0,002 a 0,823 ton. Santos *et al.* (2016) também observou produção de sedimentos nesta ordem de grandeza, variando nas suas medições de 0,001 a 0,067 ton ha⁻¹. Observou-se que os eventos com maior perda de solo foram os que também apresentaram maior escoamento, indicando que a perda de solo esta diretamente ligada à capacidade de transporte do escoamento. Santos *et al.*, (2016) também sugere que a produção de sedimento de uma área está relacionada à capacidade de transporte do escoamento, nos casos onde há sedimentos desagregados disponíveis ao transporte corroborando com Medeiros *et al.* (2014).

5.3 Modelagem dos processos hidrossedimentológicos nas bacias experimentais

Para estimativa da erosão nas bacias experimentais BEVC e MEVC utilizou-se a Equação Universal de Perdas de Solo Revisada – RUSLE, com suporte de ferramentas de SIG.

5.3.1 Erosividade (R)

Devido à erosividade ter sido calculada a partir de um único posto pluviométrico, não se avaliou variação espacial nas unidades em estudo sendo a variação deste fator verificada apenas temporalmente, com amplitude de 2,57 a 214,68 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ o que sugere uma baixa erosividade segundo Carvalho (2008). Esta baixa erosividade pode ser explicada pelo fato do estudo ter sido conduzido em um ano com total precipitado bem inferior à média histórica da região. Santos *et al.* (2014) afirmam que o potencial erosivo da chuva apresenta grande correlação com as alturas precipitadas, além de outras variáveis como intensidade e duração..

5.3.2 Erodibilidade (K)

Na Tabela 7 são apresentadas as frações granulométricas das amostras de solos coletadas na bacia em estudo, até a profundidade de 20 cm. Os ensaios de laboratório para avaliação da erodibilidade de forma direta englobam os ensaios de granulometria, permeabilidade, estrutura e teor de matéria orgânica do solo. Dos 35 pontos analisados verificou-se que alguns deles apresentam um percentual de material grosso elevado sendo que nos pontos 7, 9, 10, 20, 32, 34 e 35 que representa 20% do total amostrado, chegaram a

ultrapassar 50% da fração de pedregulho. As características do material grosseiro pode ser um fator redutor da erodibilidade, já que se necessita muito mais energia para desagregar e transportar essas frações de solo, além de atuar como uma proteção às partículas mais finas localizadas embaixo. Em geral, observou-se a predominância granulométrica de areia fina, com média de 33,4%, seguida por pedregulho e areia média, com frações médias de 21,2 e 17,6%, respectivamente.

Tabela 8 – Granulometria do solo nos pontos de determinação de erodibilidade

Ponto	Ped. (%)	AG. (%)	AM. (%)	AF. (%)	Silte (%)	Argila (%)
1	37,71	8,80	22,58	16,86	6,79	7,26
2	1,02	7,64	26,56	17,93	18,57	28,27
3	0,80	1,98	23,22	47,60	14,78	11,62
4	1,24	8,32	22,98	32,82	16,87	17,77
5	2,73	7,34	32,63	32,67	12,81	11,81
6	26,43	10,27	20,36	23,35	9,64	9,95
7	51,78	3,78	12,74	23,21	3,91	4,57
8	38,90	3,17	13,12	26,02	11,97	6,81
9	52,08	9,20	8,53	20,59	4,96	4,64
10	54,68	9,53	6,00	16,15	6,38	7,27
11	14,01	6,01	19,32	39,05	9,01	12,60
12	11,02	2,65	9,79	59,40	9,35	7,79
13	0,37	1,61	17,77	60,51	4,91	14,83
14	35,03	11,21	10,50	25,29	3,39	14,58
15	0,62	2,31	14,37	35,71	20,25	26,74
16	0,42	2,16	17,80	46,07	19,86	13,70
17	0,58	1,18	21,30	51,35	14,14	11,44
18	0,04	1,13	21,26	58,16	11,81	7,60
19	0,64	2,50	18,82	43,61	17,88	16,54
20	60,53	16,66	7,67	6,49	4,11	4,54
21	19,41	21,61	17,37	16,33	11,12	14,15
22	2,40	9,17	26,05	25,11	16,01	21,27
23	0,16	2,60	14,58	58,35	15,70	8,62
24	27,31	6,50	33,42	21,51	5,38	5,88
25	0,07	1,45	22,04	57,68	8,65	10,11
26	23,14	4,43	13,38	33,31	14,27	11,47
29	9,95	3,84	20,31	41,82	9,97	14,12
30	3,20	3,06	20,20	49,11	7,76	16,66
31	30,70	7,06	18,87	26,77	7,89	8,72
32	68,97	1,96	3,23	10,29	5,55	10,00
33	1,24	3,36	17,06	51,32	11,94	15,07
34	70,18	5,79	6,64	8,73	3,29	5,38
35	74,47	4,67	4,81	5,77	6,39	3,88
36	19,49	15,35	20,21	19,41	8,83	16,70
37	0,06	1,34	32,01	59,76	1,06	5,78

Ped.: pedregulho (acima 4,8 mm); AG: areia grossa (4,8 a 2,0 mm); AM: areia média (2,0 a 0,42 mm); AF: areia fina (0,42 a 0,074 mm); Silte (0,074 a 0,005); Argila (abaixo de 0,005 mm)

Os valores encontrados de granulometria resultaram em três classes estruturais dentre as quatro possíveis, sendo elas as classes 2, 3 e 4 (Tabela 8), evidenciando a predominância de frações de areia. Lira (2012), em estudo realizado na bacia do açude

Pereira de Miranda localizado no município de Pentecoste – CE, verificou predominância de areia fina em 81% de suas amostras.

A análise de permeabilidade do solo resultou em valores variando de $1,22 \text{ mm.h}^{-1}$ a $46,75 \text{ mm.h}^{-1}$ (Tabela 8), com média de $9,43 \text{ mm.h}^{-1}$. Observou-se a seguinte distribuição das amostras entre as classes de permeabilidade: a classe 2 ($20-60 \text{ mm.h}^{-1}$) ocorreu em 11,5% dos pontos; a classe 3 ($5-20 \text{ mm.h}^{-1}$) se repetiu em 37% dos pontos; a classe 4 ($2-5 \text{ mm}^{-1}$) ocorreu em 40% das amostras; e a classe 5 ($1-2 \text{ mm}^{-1}$) foi registrada em 11,5%.

O percentual de matéria orgânica variou de 0,60 a 10,45%, com uma média de 4,37%, sendo tais valores elevados em áreas de caatinga densa sem interferência antrópica. Valores semelhantes foram observados por Lira (2012), estudando a bacia do açude Pereira de Miranda. De acordo com Silva (1997), a matéria orgânica atua na estruturação e formação de agregados do solo. Alguns autores indicam que a matéria orgânica desempenha importante papel em modelos de predição de erodibilidade (WISCHMIEIR & MANNERING, (1969); DENARDIN, (1990)).

Na Tabela 8 são apresentados os valores de cada variável necessária para determinação do fator de erodibilidade do solo com os seus respectivos valores de fator K, estimados pela Equação 7. Os valores de erodibilidade variaram de 0,0098 a 0,0608 $\text{ton h MJ}^{-1} \text{ mm}^{-1}$, com uma média de $0,0321 \text{ ton h MJ}^{-1} \text{ mm}^{-1}$. De acordo com a classificação de Carvalho (2008), apenas 17% dos pontos amostrados apresentam fraca erodibilidade. Valores de erodibilidade correspondentes a classes moderada e forte foram encontrados em 25,70% e 57,30 % dos pontos amostrados, respectivamente. Isso indica que a maior parte dos solos da bacia caracteriza-se como susceptível a erosão. Beskow *et al.* (2009) alerta para a elevada susceptibilidade à erosão em área de fator de erodibilidade da ordem de superiores a $0,030 \text{ ton h MJ}^{-1} \text{ mm}^{-1}$.

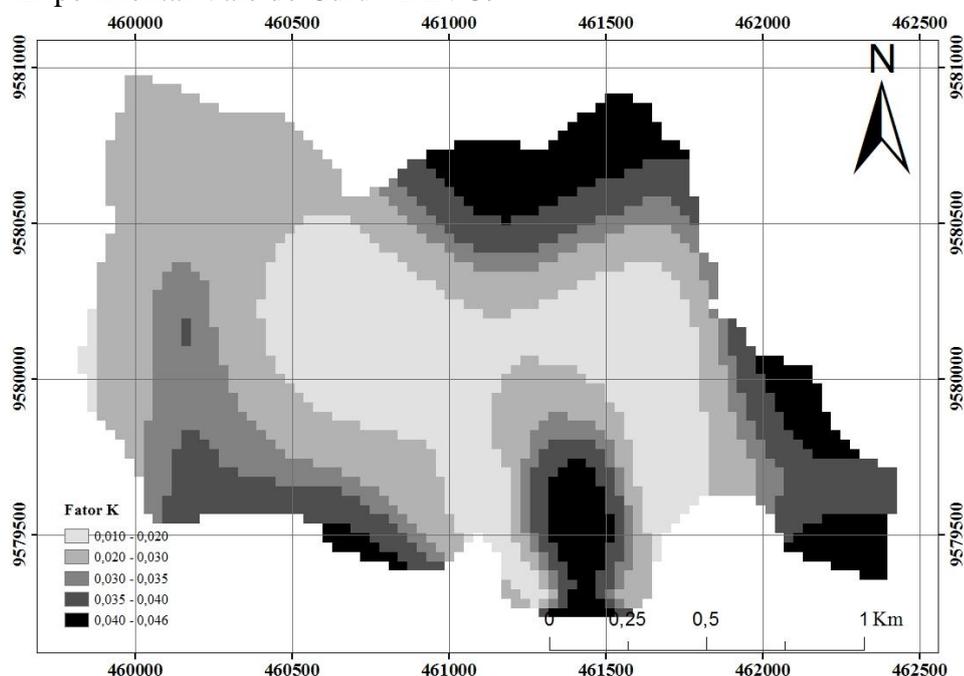
Tabela 9 – Percentual de matéria orgânica; permeabilidade, classes de permeabilidade e estrutura; Fator K, erodibilidade do solo classificada segundo Carvalho, (2008) para os solos da BEVC.

Ponto	M.O (%)	K mm h ⁻¹	Classe P	Classe S	Fator K ton h MJ ⁻¹ mm ⁻¹	Classificação Carvalho, 2008
1	2,80	4,16	4	3	0,0240	média
2	7,67	2,51	4	2	0,0127	fraca
3	5,26	6,36	3	2	0,0344	forte
4	4,42	2,10	4	2	0,0308	forte
5	3,43	12,62	3	2	0,0304	forte
6	4,28	5,38	3	3	0,0237	média
7	4,29	46,75	2	4	0,0219	média
8	3,45	8,45	3	3	0,0306	forte
9	4,25	6,10	3	4	0,0241	média
10	9,13	21,24	2	4	0,0101	fraca
11	4,56	14,23	3	2	0,0278	média
12	2,38	2,59	4	2	0,0608	forte
14	2,71	4,10	4	2	0,0512	forte
15	6,57	2,20	4	3	0,0185	média
15 ^a	6,55	6,48	3	2	0,0198	média
16	3,69	16,40	3	2	0,0439	forte
17	3,38	3,36	4	2	0,0498	forte
18	2,52	19,25	3	2	0,0579	forte
19	5,65	4,89	4	2	0,0331	forte
20	10,31	5,08	3	4	0,0098	fraca
22	7,31	11,48	3	3	0,0134	fraca
23	1,62	3,78	4	2	0,0321	forte
23 ^a	4,42	8,09	3	2	0,0488	forte
24	2,08	1,77	5	3	0,0317	forte
25	2,40	7,58	3	2	0,0535	forte
26	2,53	6,31	3	2	0,0355	forte
29	2,18	4,24	4	2	0,0425	forte
30	3,66	43,57	2	2	0,0325	forte
31	3,20	1,43	5	3	0,0347	forte
32	10,45	2,94	4	4	0,0135	fraca
33	3,89	2,16	4	2	0,0435	forte
34	6,59	1,22	5	4	0,0197	média
35	2	35,23	2	4	0,0140	fraca
36	2,66	4,63	4	3	0,0256	média
37	0,60	1,49	5	2	0,0673	forte

¹ condutividade hidráulica saturada; ² representa a classe de permeabilidade; ³ representa a classe de estrutura

De posse dos valores de erodibilidade do solo foi possível espacializar o fator K nas bacias experimentais (BEVC e MEVC) por meio de interpolação dos valores de cada um dos pontos amostrado utilizando ferramentas de SIG. A interpolação dos valores do fator K, resultou em valores de erodibilidade variando de 0,011 a 0,045 $\text{ton h MJ}^{-1} \text{mm}^{-1}$, com média de 0,025 $\text{ton h MJ}^{-1} \text{mm}^{-1}$. O valor médio encontrado nesta bacia assemelha-se ao encontrado por Araújo (2003) para sete bacias no do Estado do Ceará, de 0,026 $\text{ton h MJ}^{-1} \text{mm}^{-1}$. Já Lira (2012), em estudo realizado na bacia do açude Pereira de Miranda, encontrou uma erodibilidade média de 0,045 $\text{ton h MJ}^{-1} \text{mm}^{-1}$.

Figura 15 – Espacialização da erodibilidade do solo para a Bacia Experimental Vale do Curú - BEVC.

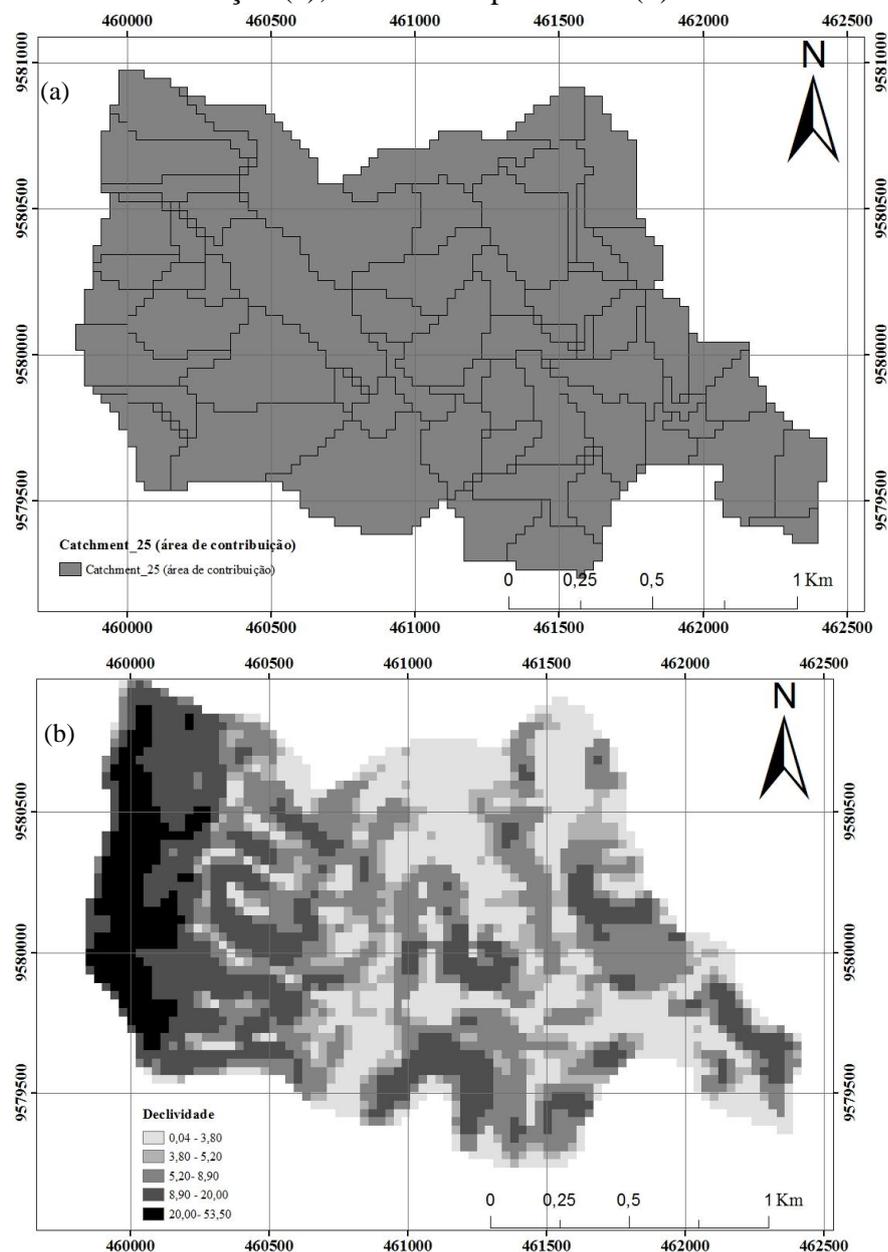


5.3.3 Fator topográfico (LS)

A partir do modelo digital de elevação (SRTM - *Shuttle Radar Topography Mission*) foram delimitadas as áreas de contribuição com 25 células (*threshold*), que resultaram em 61 subbacias (*catchment*) com áreas variando de 900 a 198.000 m^2 . Em seguida estimou-se o comprimento máximo de cada subbacia, obtendo-se valores da ordem de 120 a 3.300 m. Utilizando o mesmo modelo de elevação, foi obtida a declividade percentual da bacia, que variou de 0,047 a 56,18 %, com média de 8,05%, classificando-se

como relevo ondulado (ALEXAKIS *et al.*, 2013; SANTOS *et al.*, 2014). As maiores declividades foram na parte oeste da bacia com valores superiores a 50%.

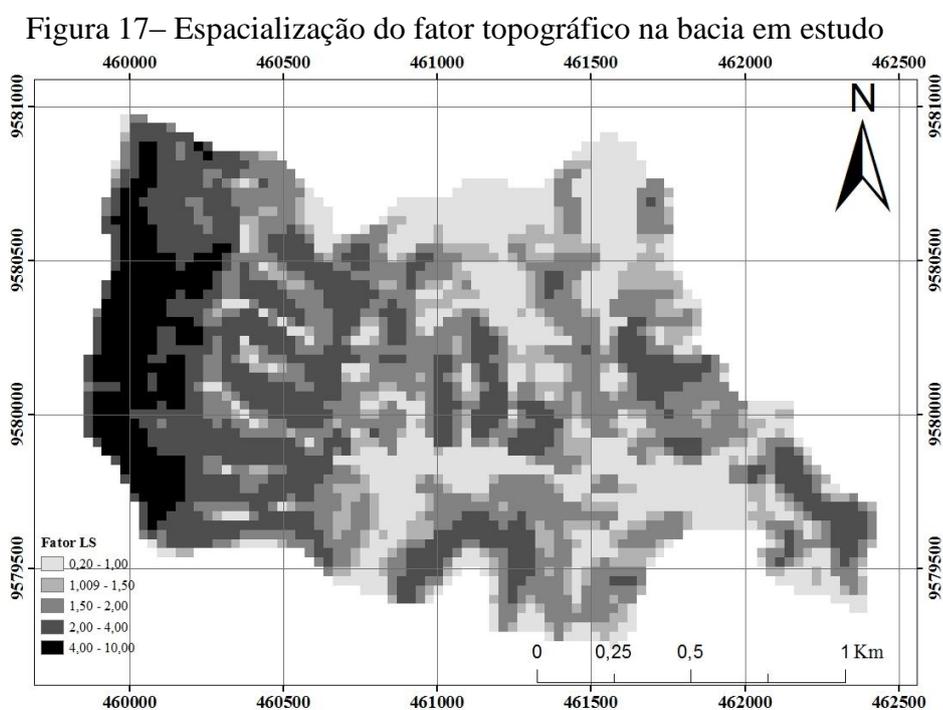
Figura 16 – Elementos resultantes do modelo digital de elevação: áreas de contribuição (a); declividade percentual (b)



Utilizado os dados dos elementos apresentados na Figura 18 e aplicando o sistema de Equações 12 a 14, obtiveram-se os valores de fator LS espacializado em toda bacia (Figura 19). Os valores de LS variaram de 0,21 nas partes de menor declividade (rede de drenagem), até 9,88 na cabeceira oeste onde são encontradas vertentes mais declivosas, com média de 1,97. Araújo (2003), estudando sete bacias de reservatórios do Estado do

Ceará, com diferentes escalas, encontrou valor médio de LS de 1,67 calculado com método semelhante.

Diversos autores têm utilizado modelos para calcular o LS de forma espacializada em bacias hidrográficas, os quais usam o conceito de fluxo acumulado (*Flowaccumulation*), porém tais modelos tem tendência a superestimar os valores de LS, principalmente próximo a rede de drenagem, onde são esperados os menores valores pra esse parâmetro (SISAY *et al.*, 2014; KAMALUDIN *et al.*, 2013; SILVA, 2003). Este estudo apresenta valores mais coerentes com LS elevado em áreas mais declivosas e maiores comprimentos de rampa e menores valores deste parâmetro em área de relevo mais suave como na rede de drenagem.

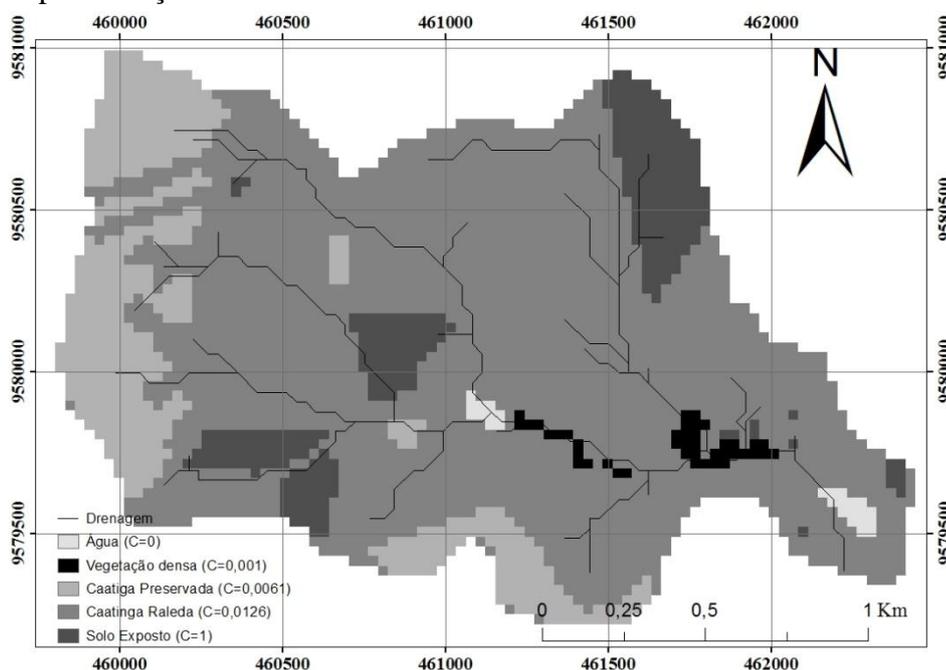


5.3.4 Fator de cobertura (C)

Durante as visitas à bacia experimental foram levantados pontos de uso e cobertura do solo usando um GPS portátil para delimitação das classes de uso na bacia, com auxílio de técnicas de SIG (Figura 19). Entre os usos observados na bacia estão: água, vegetação densa (viúva alegre), caatinga preservada, caatinga raleada e solo exposto cobrindo 0,78, 1,26, 15,90, 72,63 e 9,48% da área, respectivamente. A Cada uso foi associado a um valor para o fator C, sendo três deles extraídos diretamente da literatura

científica (água, solo exposto e vegetação densa) e dois foram calibrados em etapa anterior com base nos resultados do monitoramento nas parcelas de Wischmeier (caatinga preservada e caatinga raleada). Para os usos água, vegetação densa e solo exposto foram associados os valores de 0, 0,001 e 1, respectivamente (SANTOS, 2014; ARAUJO, 2003). Enquanto para caatinga preservada e caatinga raleada, foram associados os valores de 0,0061 e 0,0126 calibrados para as parcelas.

Figura 18– Identificação da cobertura vegetal da área de estudo e espacialização dos valores de fator C

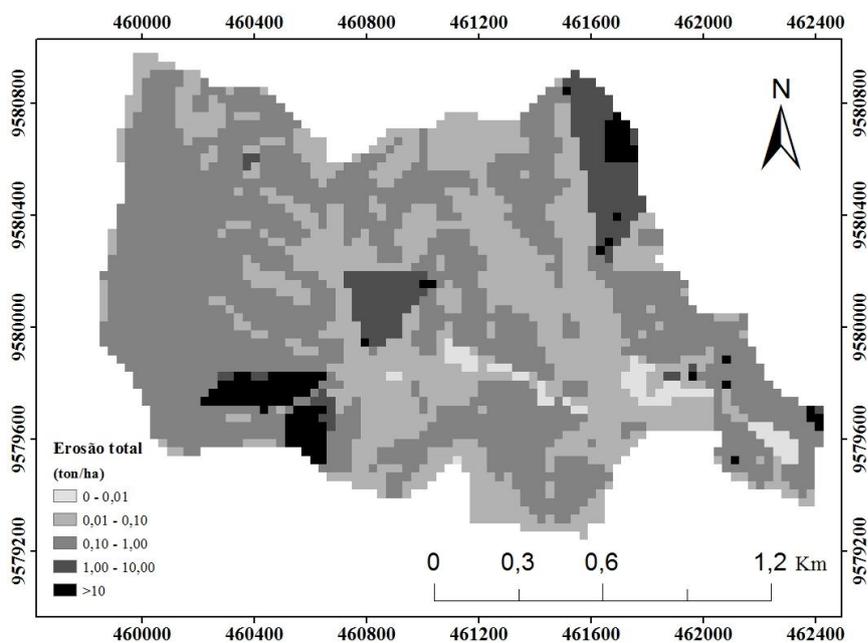


5.3.5 Erosão estimada

Após a parametrização foi aplicada a Equação Universal de Perdas de Solo Revisada – RUSLE, utilizando a técnica de sobreposição e produto de mapas de cada um dos fatores, para geração de um mapa resultante das perdas de solo. Os resultados encontrados são apresentados na Figura 20, destacando as taxas de perda de solo variando de 0 a 23,14 ton ha^{-1} , com uma média de 0,98 ton ha^{-1} . Araújo (2003), estudando diversas bacias do estado do Ceará, com diferentes escalas, encontrou médias anuais variando de 1,22 a 12,77 ton ha^{-1} . Já Santos *et al.* (2014), estudando uma bacia experimental no município de Iguatu, verificaram que as perdas de solo variaram espacialmente de 0 a 890 $\text{t ha}^{-1} \text{ano}^{-1}$ para o ano de 2013, e de 0 a 1.498 $\text{t ha}^{-1} \text{ano}^{-1}$ para o ano de 2014. Tal diferença nas taxas de perda de

solo pode está relacionada a diferentes fatores, dentre eles o potencial erosivo da chuva e a diferença na cobertura vegetal e, conseqüentemente, nos valores do Fator C utilizados.

Figura 19 – Espacialização das taxas de Erosão estimada pela Rusle em ton ha⁻¹



A espacialização das taxas de erosão na bacia deixa claro que as áreas de maior susceptibilidade ao processo erosivo são aquelas com pouca ou ausência de cobertura vegetal, associadas a relevo mais declivosos. É importante destacar que no extremo oeste da bacia, mesmo sendo uma área com predomínio de caatinga preservada, as taxas de perda de solo foram mais elevadas que as áreas de caatinga raleada. Uma explicação para esse comportamento pode estar no fato desta porção da bacia apresentar percentual de declive da região ser em maior, com maiores comprimentos de rampa. Por outro lado, na parte sul da bacia, a área de caatinga preservada apresentou as menores taxas de perda de solo, notadamente inferiores às encontradas para a caatinga raleada, evidenciando a influência da cobertura vegetal na produção de sedimentos.

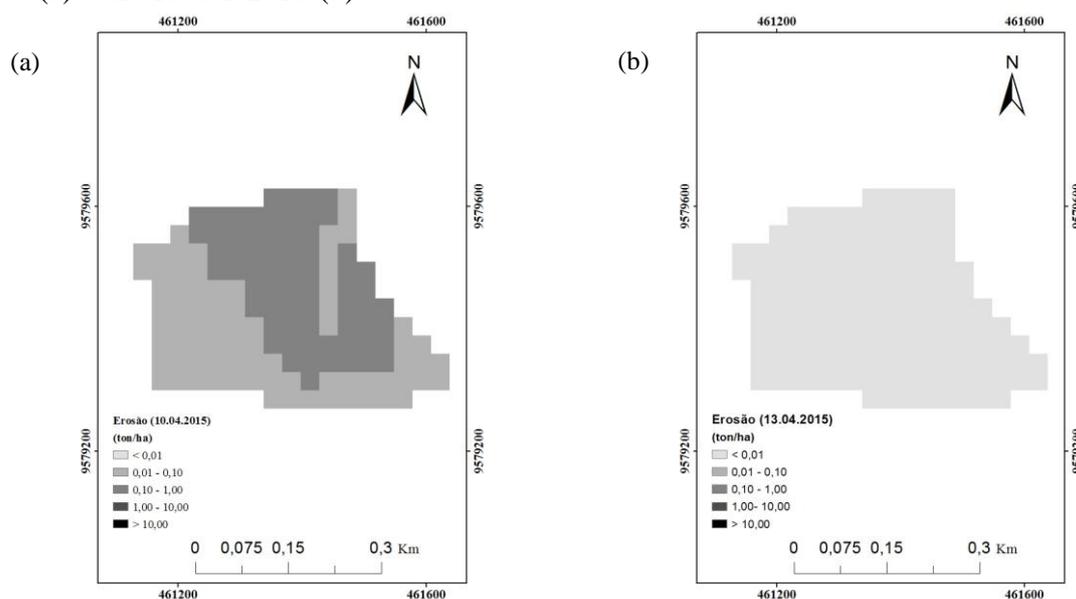
5.3.6 Razão de Aporte de Sedimento (SDR)

De posse dos parâmetros da RUSLE, espacializados para toda a bacia, foi possível estimar a erosão para cada evento monitorado nas duas áreas (MEVC e BEVC), variando apenas a erosividade associada aos diferentes eventos de chuva. A partir dos

recortes de cada área foram encontradas as taxas de erosão para cada eventos nas duas bacias monitoradas. A razão entre as taxas estimadas e as medidas no monitoramento correspondente à razão de aporte de Sedimentos - SDR.

No caso da MEVC ocorreram apenas dois eventos, registrados nos dias 10 e 13 de abril de 2015 e apresentados na Figura 21. As taxas de erosão calculadas individualmente para cada evento na MEVC apresentaram valores médios na bacia de $0,0967 \text{ ton ha}^{-1}$ e $0,0017 \text{ ton ha}^{-1}$ nos eventos dos dias 10 e 13 de abril de 2015, respectivamente. Tal diferença se deve ao potencial erosivo de dia 10 de abril ter sido muito superior ao observado no dia 13 daquele mês. Nestes eventos dos dias 10 e 13 de abril de 2015, as perdas de solo na MEVC foram de 1,334 ton e 0,025 ton, respectivamente.

Figura 20 – Erosão estimada em eventos individuais na MEVC, dia 10-abr-2015 (a) e dia 13-abr-2015 (b)

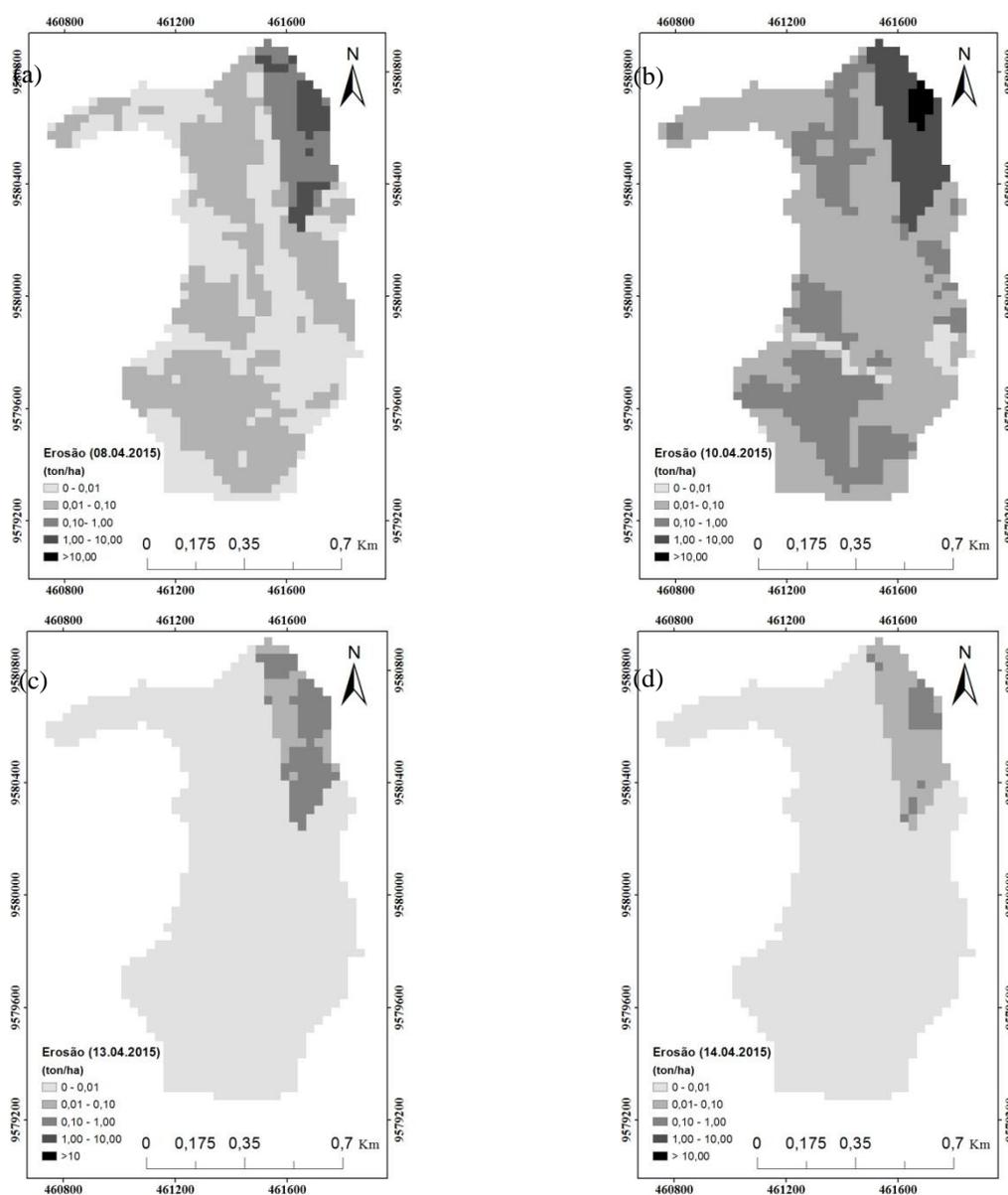


Já na área da BEVC foram registrados quatro eventos, dos quais dois coincidiram com os da MEVC e os outros dois foram nos dias 8 e 14 de abril de 2015. As taxas erodidas estimadas para esses eventos são apresentadas na Figura 23. Os valores de erosão média estimada para esses eventos foram de $0,1103$, $0,7834$, $0,0145$ e $0,0093 \text{ ton ha}^{-1}$ para os eventos dos dias 8, 10, 13 e 14 de abril de 2015, respectivamente. Santos *et al.* (2014) estimaram valores de erosão variando de $0,553 \text{ ton}$ a $12,683 \text{ ton}$ por evento para uma nos eventos monitorados em uma bacia de pouco mais de 16 km^2 em região semiárida.

O menor número de eventos de escoamento na microbacia MEVC não era esperado, considerando se tratar de uma bacia de cabeceira. Contudo, os baixos valores de

escoamento superficial e perda de solo podem estar associados ao fato dessa área possuir maior grau de conservação, ou ainda, por apresentar menores declives. Medeiros *et al.* (2014) afirmam que áreas menos declivosas favorecem a deposição de sedimentos desagregados, reduzindo a taxa de produção de sedimentos e, conseqüentemente, a razão de aporte de sedimentos.

Figura 21 – Erosão estimada em eventos individuais na BEVC, dia 80-abr-2015 (a); dia 10-abr-2015 (b); dia 13-abr-2015 (c) dia 14-abr-2015 (d)



Comparando-se a produção de sedimento estimada com as medidas durante o monitoramento das unidades de estudos, observou-se que a razão de aporte de sedimento

(SDR) variou de 6,65 a 43,51% para a MEVC e de 1,05 a 6,73% para BEVC. Estes valores de razão de aporte de sedimento observados foram muito menores que os calculados pelo modelo de Maner (Tabela 9), indicando que a formulação de Maner pode apresentar tendência de superestimar os valores de SDR em bacias de menor parte em região de cabeceira.

Tabela 10 – Totais erodidos por evento acompanhados das razões de aporte observadas e obtidas pelo modelo de Maner

	Produção de sedimentos observada	Erosão Estimada (RUSLE)	SDR1* calculado	SDR2** calculado	Produção de sedimentos calculada (SDR2)
	ton	ton	%	%	ton
Data			MEVC		
10-abr-15	0,580	1,334	43,51	54,83	0,731
13-abr-15	0,002	0,025	6,65		0,014
Data			BEVC		
8-abr-15	0,116	11,036	1,05	13,56	1,496
10-abr-15	0,823	78,344	1,05		10,623
13-abr-15	0,054	1,456	3,73		0,197
14-abr-15	0,063	0,938	6,73		0,127

* Estimado pela relação entre a produção de sedimentos observada e a erosão estimada pela RUSLE

** Estimado pela equação de Maner (1958)

Como pode ser observado na Tabela 9, os eventos de 13 e 14 de abril, mesmo apresentando menores valores de escoamento, apresentaram maior razão de aporte de sedimentos. Uma razão para isso pode estar no fato dos eventos anteriores terem provocado a desagregação do solo, disponibilizando-o para ser transformado nos eventos subsequentes. Santos *et al.* (2016) e Medeiros e Araújo (2014) observaram comportamento semelhante com valores mais expressivos de SDR em eventos de baixa magnitude, em decorrência da formação de bancos de sedimentos remobilizados mas não transportado em eventos anteriores. Eventos posteriores, mesmo de menor precipitação e erosividade, podem transportar sedimentos já desagregados e disponíveis, aumentando assim a produção de sedimentos e o SDR.

6 CONCLUSÕES

Escoamento superficial e coeficiente de escoamento na escala de parcelas foram menores na cobertura de caatinga em pousio a 40 anos, do na cobertura de caatinga com pousio de 8 anos. No que diz respeito as microbacias em estudo tanto a MEVC, quanto a BEVC apresentaram coeficiente de escoamento elevados.

As taxas de perda de solo estimadas para as parcelas foram inferiores as taxas estimadas nas duas microbacias. A estimativa dos valores do fator C para a vegetação Caatinga sujeita a dois tipos de manejo (8 e 40 anos de pousio) foi adequadamente realizada com base nas medições de variáveis hidrossedimentológicas. Se enquadrando como aceitável e boa, para coberturas de caatinga com 8 e 40 anos de pousio respectivamente.

Ocorrem eventos com maiores valores de SDR mesmo estes apresentando menores escoamentos. Indicando que o material erodido em um evento qualquer que não apresente capacidade de transporte suficiente para carrear do todo esse material, pode ser careado por um evento posterior por está facilmente disponível.

A aplicação do modelo RUSLE e SDR, com suporte de ferramentas de SIG permitiu uma boa estimativa da produção de sedimentos nas bacias experimentais, na escala de eventos, conforme análise comparativa com dados medidos nas seções de controle. Observou-se, ainda, que os valores de SDR são notavelmente superiores na MEVC, o que pode ser explicado pela maior conectividade dos processos hidrossedimentológicos naquela escala. Além disso, pode-se perceber, também, que o método de Maner (1958) tende a superestimar os valores de razão de aporte de sedimentos na escala de estudo.

REFERÊNCIAS

AGUIAR, M. I.; MAIA, S. M. F.; OLIVEIRA, T. S.; MENDONÇA, E. S.; ARAUJO FILHO, J. A. Perdas de solo, água e nutrientes em sistemas agroflorestais no município de Sobral, CE. **Revista Ciência Agronômica**, v. 37, n. 03, p.270-278, 2006.

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

ALBUQUERQUE, A. W.; 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.

ALEXAKIS, D. D.; HADJIMITSIS, D.G.; AGAPIOU, A. Integrated use of remote sensing, GIS and precipitation data for the assessment of soil erosion rate in the catchment area of “Yialias” in Cyprus. **Atmospheric Research**, v.131, p.108–124, 2013.

ARAÚJO, J. C. DE, DÖLL, P., GÜNTNER, A., KROL, M., ABREU, C. B. R., HAUSCHILD, M., MENDIONDO, E. M. Water scarcity under scenarios for global climate change and regional development in semiarid Northeastern Brazil. **Water International**, v. 29 (2), p. 209-220, 2004.

ARAÚJO, J. C. de. Assoreamento em Reservatórios do Semiárido: modelagem e validação. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. v.8 n.2 p. 39–56, 2003.

ARAÚJO NETO, J.R.; BRASIL, P. P.; PALÁCIO, H. A. Q.; SANTOS, J. C. N.; GOMES, F. E.F.; ANDRADE, E. M. Escoamento superficial versus classes de chuva em microbacia semiárida com manejo alternativo da caatinga. **Anais... Congresso de Agroecologia do Semiárido & VII Simpósio Brasileiro De Desenvolvimento Sustentável Do Semiárido**. Mossoró-RN, 2015

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13600: Solo - Determinação do teor de matéria orgânica por queima a 440°C. Rio de Janeiro, dez 1996.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 14545: Solo: determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos a carga variável. Rio de Janeiro, 2000.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7181: Solo: análise granulométrica. Rio de Janeiro, dez 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6457: Amostras de Solo: preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, ago 1986.

BAKKER, M. M.; GOVERS, G.; KOSMAS, C.; VANACKER, V.; VAN OOST, K.; ROUNSEVELL, M. Soil erosion as a driver of land-use change. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 105, p. 467–481, 2005.

BAPTISTA, G. M. M. **Diagnóstico ambiental de a perda laminar de solos por meio do geoprocessamento**. 1997. 112f. Dissertação (Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos). – Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília 1997.

BERTOL, I.; LEITE, D.; ENGEL, F. L.; COGO, N. P.; GONZÁLEZ, A. P. Erodibilidade de um nitossolo háplico alumínico determinada em condições de campo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.31, p. 541-549, 2007.

BERTOL, I.; SCHICK, J.; BATISTELA, O. Razão de perdas de solo e fator C para as culturas de soja e trigo em três sistemas de preparo em um Cambissolo Húmico Alumínico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 25, p. 451-461, 2001.

BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. **Conservação do Solo**. 9ª edição Ícone, São Paulo 2014.

BIZUWERK, A., TADDESE, G., GETAHUN, Y.: Application of GIS for Modelling Soil Loss Rate in Awash Bagin. **International Livestock Research Institute (ILRI)**, Ethiopia, 2008.

BRASIL. (1973) Ministério da Agricultura. **Levantamento exploratório**: reconhecimento de solos do Estado do Ceará. MAPA/SUDENE, v. 1, p.301 (Boletim Técnico, 28). Rio de Janeiro, 1973.

BRASIL.(1973) Ministério da Agricultura. Departamento Nacional de Pesquisa Agropecuária. Divisão de Pesquisa Pedológica. **Levantamento exploratório**: reconhecimento de solos do Estado de Pernambuco. Recife: Sudene, 1973. v.1, 359 p. (Boletim Técnico, 26).

CARVALHO, N. O. **Hidrossedimentologia prática**. Rio de Janeiro: Editora Interciência, 2008. 326p.

CASSOL, E. A.; LIMA, V. S. Erosão em entre sulcos sob diferentes tipos de preparo e manejo do solo. **Pesquisa agropecuária brasileira**, Brasília, v. 38, n. 1, p. 117-124, jan. 2003

CERDAN, O.; GOVERS, G.; BISSONNAIS, Y. LE; VAN OOST, K.; POESEN, J.; SABY, N.; GOBIN, A.; VACCA, A.; QUINTON, J.; AUERSWALD, K.; KLIK, A.; KWAAD, F.J.P.M.; RACLOT, D.; IONITA, I.; REJMAN, J.; ROUSSEVA, S.; MUXART, T.; ROXO, M.J.; DOSTAL T. Rates and spatial variations of soil erosion in Europe: A study based on erosion plot data. **Geomorphology**, v. 122, p. 167-177, 2010.

CPRM – COMPANHIA DE PRODUÇÃO DE RECURSOS MINERAIS. **Atlas de geologia e recursos minerais do Ceará**: Sistema de Informações Geográficas SIG e mapa na escala 1:500.000. In: Cavalcante, J. C.; Vasconcelos, A. M.; Gomes F. E. M. Serviço Geológico do Brasil/ Secretária dos Recursos Hídricos do Ceará. Fortaleza. CPRM Serviço Geológico do Brasil, 1 CD ROM. (2003).

DALLA, L. F. R. **Estimativas da produção de sedimentos nas bacias hidrográficas dos rios Santa Maria do Rio Doce e Santa Joana com utilização da EUPS**. 2011. 106f. (Trabalho de Conclusão de Curso) - Departamento de Engenharia Ambiental do Centro Tecnológico, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2011.

DENARDIN, J.E. **Erodibilidade do solo estimada por meio de parâmetros físicos e químicos**. 1990. 113 f. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1990.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Agroindústria Tropical. **Dados climatológicos**: Estação de Pentecoste, 2000. Fortaleza: Embrapa Agroindústria Tropical/UFC, 2001.

FAO – FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. **La erosión del suelo por el agua: algunas medidas para combatirla en las tierras de cultivo.** Roma, 1967. 207p.

FARINASSO, M.; CARVALHO JÚNIOR, O. A.; GUIMARÃES, R. F.; GOMES, R. A. T.; RAMOS, V. M. Avaliação qualitativa do potencial de erosão laminar em grandes áreas por meio da EUPS – Equação Universal de Perdas de Solos utilizando novas metodologias em SIG para os cálculos dos seus fatores na região do Alto Parnaíba – PI-MA. **Revista Brasileira de Geomorfologia** – n. 2, 2006.

FOSTER, G. R.; MCCOOL, D. K.; RENATO, K. G.; MOLDENHAUER, W. C. Conservation of the Universal Soil Loss Equation the SI metric units. **Journal of Soil and Water Conservation**, v. 36, p. 355-359, 1981.

FOSTER, G.R. Modelling the erosion process. In: HAAN, C.T.; JOHNSON, H.D. & BRAKENSIEK, D.L. **Hydrologic modeling of small watersheds**. St. Joseph, ASAE, 1982. p. 297-380.

GUERRA, A. J. T. 1999. O início do processo erosivo. In: GUERRA, A. J. T.; SILVA, A. S.; BOTELHO, R. G. M. **Erosão e conservação dos solos: conceitos, temas e aplicações**. Rio de Janeiro, Bertrand Brasil, 1999.

INÁCIO, E. S. B.; CANTALICE, J. R. B.; NACIF, P. G. S.; ARAUJO, Q. R.; BARRETO, A. C. Quantificação da erosão em pastagem com diferentes declives na micro bacia do Ribeirão Salomea. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 11, n. 4, p. 355–360, 2007.

JACOMINE, P.K.T. Solos sob caatingas: características e uso agrícola. In: ALVAREZ V., V.H.; FONTES, L.E.F. FONTES, M.P.F. **O solo nos grandes domínios morfoclimáticos do Brasil e o desenvolvimento sustentável**. Viçosa, SBCS-UFV, 1996. 930p.

KAMALUDIN, H.; LIHAN, T.; ALI RAHMAN, Z.; MUSTAPHA, M. A.; IDRIS, W. M.; RAHIM, R S. A. Integration of remote sensing, RUSLE and GIS to model potential soil loss and sediment yield (SY). **Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.**, n. 10, p. 4567–4596, 2013.

MALDONADO, F. D. **Desenvolvimento e avaliação de uma metodologia de detecção de mudanças na cobertura vegetal do semiárido**. 2005. 311f. Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto). INPE, São José dos Campos, 2005.

MALVEZZI, R. **Semiárido: uma visão holística** (Pensar Brasil). Brasília. Confea, 140 p. 2007.

MAMEDE, G. L. **Modelagem Hidrossedimentológica com Vistas a Cenários de Mudança Global**. 2002. 90f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental. Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2002.

MANER, S.B. (1958). Factor affecting sediment delivery rates in the Red Hill physiographic area. **Transaction of American Geophysics**. v. 39 p. 669-675. 1958.

MEDEIROS, P. H. A.; ARAÚJO, J. C. Temporal variability of rainfall in a semiarid environment in Brazil and its effect on sediment transport processes. **Journal Soils Sediments**. v14, p1216-1223, 2014.

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.

PEIXOTO, J.S. **Estimativa das perdas de solo e do transporte de chumbo e zinco por erosão hídrica no entorno da cidade de Santo Amaro da Purificação, Bahia.** (Dissertação - Programa De Pós-Graduação Em Solos E Qualidade De Ecossistemas) - Universidade Federal Do Recôncavo Da Bahia, Cruz das Almas, 2013.

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

PRUSKI, F. F. Fatores que interferem na erosão hídrica do solo. In: PRUSKI, F. F. **Conservação de solo e água: práticas mecânicas para o controle da erosão hídrica.** Viçosa, Editora UFV, p.41-74. 2006.

RUHOFF, A. L. Avaliação dos processos erosivos na bacia do Arroio Grande, RS, através da equação universal de perdas de solos. **Anais...** 1º Simpósio de Geotecnologias no Pantanal, Campo Grande, Brasil, 11-15 novembro 2006, Embrapa Informática Agropecuária/INPE, p.229-238.

SÁ, I.B.; SILVA, P.C.G (Eds). **Semiárido brasileiro: Pesquisa, desenvolvimento e inovação.** Petrolina, Embrapa Semiárido, 2010. 402p

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

SANTOS, J. C. N. dos. **Erosão laminar em microbacia com cobertura herbácea no semiárido cearense.**2009. 71f. Monografia (graduação) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará – Campus Iguatu, 2009.

SANTOS, J. C. N.; ANDRADE, E. M.; MEDEIROS, P. H. A.; ARAÚJO NETO, J. R.; PALÁCIO, H. A. Q.; RODRIGUES, R. N. Determinação do fator de cobertura e dos coeficientes da MUSLE em microbacias no semiárido brasileiro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. v.18, n.11, p.1157-1164, Campina Grande, 2014.

SANTOS, J. C. N.; ANDRADE, E. M.; MEDEIROS, P. H. A.; PALÁCIO, H. A.Q.; ARAÚJO NETO, J. R. Sediment delivery ratio in a small semi-arid watershed under conditions of low connectivity **Revista Ciência Agronômica**, v. 48, n. 1, p. 49-58, jan-mar, 2016

SANTOS, J. C. N.; ANDRADE, E. M.; Palácio, H. A. Q.; ARAÚJO NETO, J. R.; RIBEIRO FILHO, J. C. Erosividades das chuvas em iguatu-ce: Correlação com o coeficiente de chuva

e aplicação as normais climatológicas do nordeste. **Anais...** XI Encontro Nacional de Engenharia de Sedimento, João Pessoa - PB de 01 a 05 de dezembro 2014.

SILVA, A. M.; RANZINI, M.; GUANDIQUE, M. E. G.; ARCOVA, F. C. S. DE CICCIO, V. Estudo integrado do processo erosivo numa microbacia experimental localizada no município de Cunha – SP, **Geociências**, Vol. 24, p. 43-54. 2005.

SILVA, I. F.; CAMPOS FILHO, O.R; ANDRADE, A.P.; COÊLHO, E.A. C; DINIZ, E.J. Influência do cultivo isolado e do consórcio sobre as perdas de solo e água numa terra roxa estruturada. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.13, p.111-115, 1989.

SILVA, P. M. O. **Modelagem do escoamento superficial e da erosão hídrica na sub-bacia hidrográfica do Ribeirão Marcela, Alto Rio Grande, MG**. 2006.155f. Tese (Doutorado) Universidade Federal de Lavras. Lavras - MG. 2006.

SILVA, R. M.; PAIVA, F. M. L.; MONTENEGRO, S. M. G. L; SANTOS, C. A. G. Aplicação de equações de razão de transferência de sedimentos na bacia do rio gameleira com suporte de sistemas de informação geográfica. **Anais...** XVIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Campo Grande – MS, Brasil. 22 a 26 de novembro de 2009.

SILVA, V. C. Cálculo automático do fator topográfico (LS) da eups, na bacia do Rio Paracatu. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, n. 33 (1), p. 29-34, 2003

SISAY, A.; CHALIE, N.; Girmay, Z.; Takele, G.; Tolera, A. Landscape–scale Soil Erosion Modeling and Risk Mapping of Mountainous areas in Eastern Escarpment of Wondo Genet Watershed, Ethiopia. **International Research Journal of Agricultural Science and Soil Science**. V. 4(6) p. 107-116, 2014.

VAEZI, A. R. Modeling Runoff from Semi-Arid Agricultural Lands in Northwest Iran. **Pedosphere**, v. 24, n. 5, p. 595 - 604, 2014

VITTE, A. C.; MELLO, J. P. Considerações sobre a erodibilidade dos solos e a erosividade das chuvas e suas consequências na morfogênese das vertentes: um balanço bibliográfico. **Climatologia e Estudos da Paisagem**, v. 2, p. 23-38, 2007.

WIEGAND, M.C. **Proposta metodológica para a estimativa da produção de sedimentos em grandes bacias hidrográficas: Estudo de caso Alto Jaguaribe, CE**. 2009. 113f. (Dissertação de Mestrado). Departamento de Engenharia Agrícola, Universidade Federal do Ceará – UFC, Fortaleza, 2009.

WISCHMEIER, W.H., JOHNSON, C. B. e CROSS, B.V. A soil erodibility nomograph for farmland and construction sites. **Journal Soil and Water Conservation**, v.26, 189-193. 1971.

WISCHMEIER, W.H; SMITH, D.D. **Predicting rainfall erosion losses: A guide to conservation planning**. In: Agricultural Handbook. Washington, USDA, 1978.