

CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA

DANIELY LIDIANY COSTA LIRA

**ASSOREAMENTO EM DENSAS REDES DE RESERVATÓRIOS: O CASO DA
BACIA HIDROGRÁFICA DA BARRAGEM PEREIRA DE MIRANDA, CE**

FORTALEZA – CE

2012

DANIELY LIDIANY COSTA LIRA

ASSOREAMENTO EM DENSAS REDES DE RESERVATÓRIOS: O CASO DA BACIA
HIDROGRÁFICA DA BARRAGEM PEREIRA DE MIRANDA, CE

Dissertação submetida a Coordenação do Curso de Pós- Graduação em Engenharia Agrícola, da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestrado em Engenharia Agrícola. Área de concentração: Manejo e Conservação de Bacias Hidrográficas no Semiárido.

Orientador: Prof. Dr. George Leite Mamede

FORTALEZA

2012

DANIELY LIDIANY COSTA LIRA

ASSOREAMENTO EM DENSAS REDES DE RESERVATÓRIOS: O CASO DA BACIA
HIDROGRÁFICA DA BARRAGEM PEREIRA DE MIRANDA, CE

Dissertação submetida à Coordenação do Curso de Pós- Graduação em Engenharia Agrícola, da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestrado em Engenharia Agrícola. Área de concentração: Manejo e Conservação de Bacias Hidrográficas no Semiárido.

Aprovada em: 27 de Abril de 2012

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. George Leite Mamede

Prof. Dr. José Carlos de Araújo

Prof. Dr. Pedro Henrique Augusto Medeiros

A meu pai Manoel Jales de Lira e a minha mãe
Antonia Castro da Costa Lira.

DEDICO

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela vida, saúde e pela oportunidade que me foi dada de crescer como pessoa e como profissional.

Aos meus pais e irmãos pelo amor, incentivo, compreensão, apoio e confiança depositada durante o decorrer do curso.

Ao professor George Leite Mamede pela orientação, dedicação, compreensão e motivação durante o decorrer da pesquisa.

Ao amigo Cristian Epifâneo Toledo, pelos ensinamentos e todo o auxílio nas viagens de campo.

Ao grupo Hidrosed por ceder equipamentos para realização da pesquisa.

Aos funcionários do Laboratório de Mecânica dos Solos e Pavimentação da UFC pelo auxílio prestado durante a realização dos ensaios.

Ao Labosan por ceder suas dependências para realização de ensaios.

Aos amigos que me acompanharam durante o mestrado no Departamento de Engenharia Agrícola, em especial Nayara Luna, pela amizade que me foi dedicada, e por estar sempre presente

Aos professores do Departamento de Engenharia Agrícola pelos conhecimentos repassados.

À FUNCAP pela concessão da bolsa de estudos.

RESUMO

LIRA, Daniely Lidiany Costa. Universidade Federal do Ceará, Abril, 2012. **Assoreamento em densas redes de reservatórios: o caso da bacia hidrográfica da barragem Pereira de Miranda, CE.** Orientador: George Leite Mamede. Examinadores: José Carlos de Araújo, Pedro Henrique Augusto Medeiros.

O presente estudo tem como objetivo analisar os impactos da densa rede de reservatórios da bacia hidrográfica do açude Pereira de Miranda (Pentecoste) na produção de sedimentos e capacidade de armazenamento hídrica do sistema. A bacia estudada localiza-se no Nordeste Brasileiro, no Estado do Ceará, com uma área de aproximadamente 3.230 km². Possui uma precipitação média anual de 854 mm e evaporação potencial média observada em tanque do tipo classe A é de 1.464 mm. O solo e a vegetação predominante são do tipo luvisolo e caatinga arbustiva aberta. Imagens de satélite de anos úmidos foram utilizadas para levantamento da açudagem na bacia. Foram identificadas unidades de erosão derivadas da sobreposição de mapas dos parâmetros da Equação Universal de Perdas do Solo (EUPS), o que permitiu a estimativa da erosão localizada na bacia e identificação de áreas potencialmente produtoras de sedimento. Um modelo simplificado foi utilizado para simular a propagação de sedimentos pela densa rede de reservatórios da bacia. Para estimativa do assoreamento no reservatório Pereira de Miranda, diferentes cenários de estrutura do sistema foram considerados. Foi estimada uma taxa de erosão média na bacia de 59 t.ha⁻¹.ano⁻¹, sendo que 42% da área da bacia apresenta grau de erosão moderado. De acordo com o modelo, o assoreamento do reservatório Pentecoste pode variar de 1,1 a 2,6% por década, dependendo do cenário considerado. Observa-se ainda que os reservatórios de montante podem reter até 58% do sedimento que chegaria ao açude Pereira de Miranda. Os reservatórios muito pequenos, com capacidade de até 100.000 m³, embora representem apenas 1,83% da disponibilidade hídrica do sistema, são capazes de reter quase 8% do total de sedimento produzido. Análises de sensibilidade mostram que a capacidade de retenção de sedimentos nos reservatórios de montante pode variar de 20 a 58%, dependendo da estrutura do sistema quanto à existência de reservatórios de diferentes classes de tamanho. Constata-se ainda que a taxa de redução da capacidade de armazenamento hídrica do sistema em função do assoreamento dos reservatórios de montante é relativamente maior do que a observada para o açude Pereira de Miranda, devido à retenção de sedimentos a montante.

Palavras Chave: Erosão. Assoreamento. Redes de reservatórios. Armazenamento hídrico superficial.

ABSTRACT

LIRA, Daniely Lidiany Costa. Universidade Federal do Ceará, April, 2012. **Sedimentation in dense networks of reservoirs in water availability in the region: the case of the dam basin Pereira de Miranda, CE.** Advisor: George Leite Mamede. Examiners: Jose Carlos de Araujo, Pedro Henrique Augusto Medeiros.

The present study aims at analyzing the impacts of the dense reservoir network of the Pereira de Miranda catchment in its sediment yield and water storage capacity of the system. The studied area is located in the Brazilian Semiarid region, in the State of Ceará, with an area of approximately 3230 km². It has an average annual rainfall of 854 mm and an annual potential evaporation of 1464 mm. The predominant soil and vegetation type are luvissoles and open shrub caatinga. Satellite imageries from wet years were used to identify the reservoirs of the catchment. Erosion units were identified derived from map overlay of the parameters of the Universal Soil Loss Equation (USLE), which enables the estimation of sediment yield and the identification of areas with high sediment production. A simplified model was used to simulate the sediment routing through the dense reservoir network of the basin. For the estimation of sedimentation at the Pereira de Miranda Reservoir, different scenarios of the system structure were considered. A mean erosion rate of 59 t.ha⁻¹.year⁻¹ was estimated for the basin, in which 42% of the basin area presents a moderate degree of erosion. According to the model, silting of the Pereira de Miranda reservoir may vary from 1.1 to 2.6 %/decade⁻¹, depending on the scenario considered. One may observe that upstream reservoirs are able to retain until 58% of the sediments that would reach the Pereira de Miranda reservoir. The very small reservoirs, with storage capacity below 100,000 m³, are able to retain almost 8% of the generated sediments, although they represent just 1.83% of the system water storage capacity. Sensitivity analysis shows that the sediment retention capacity of the upstream reservoirs may vary from 20 to 58%, depending on the system structure concerning the presence of upstream reservoirs from different size classes. One may still conclude that the reduction rate of water storage capacity at the system as a function of reservoir siltation is relatively larger than that observed for the Pereira de Miranda reservoir, due to the upstream sediment retention.

Keywords: Erosion. Silting. Dense reservoir network. Surface water storage.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Nomograma de Wischmeier para cálculo da erodibilidade dos solos	25
Figura 2 – Hidrografia e localização da bacia hidrográfica do açude Pentecoste em relação ao Ceará e ao Brasil.....	30
Figura 3 - Localização dos Postos pluviométricos	32
Figura 4 - Precipitação média e evaporação média na bacia hidrográfica do açude Pentecoste	33
Figura 5 - Localização dos postos fluviométricos	34
Figura 6 - Tipos de solo na bacia hidrográfica do açude Pentecoste de acordo com o mapa base de Reconhecimento dos solos no Estado do Ceará, na escala de 1:600.000	35
Figura 7 - Classes de vegetação existente na bacia hidrográfica do açude Pentecoste	36
Figura 8 - Imagem LadSat 5, sensor: TM, detalhe do reservatório Pentecoste (A 10/2004, B 07/1985).....	37
Figura 9 - Localização dos pontos amostrados para determinação da permeabilidade do solo na bacia hidrográfica do açude Pentecoste	42
Figura 10 - Coleta de amostras de solo para determinação do fator de erodibilidade k.....	43
Figura 11 - Análise granulométrica por sedimentação e peneiramento	43
Figura 12 - Permeâmetro de carga variável.....	44
Figura 13 - Mufla à 440 °C para determinação do teor de matéria orgânica	46
Figura 14 - Curva média de retenção de sedimentos através do método de Brune.....	50
Figura 15 - Demonstrativo do balanço de sedimentos utilizando modelagem desenvolvida pelo grupo Hidrosed	51
Figura 16 - Localização dos açudes levantados na bacia Pentecoste.	53
Figura 17 - Gráfico comparativo entre os volumes a partir dos métodos da equação do tronco de cone e da equação de Molle.....	54
Figura 18 - Volume armazenado por classes dos reservatórios.....	56
Figura 19 - Diferença entre as áreas dos espelhos de dois açudes da bacia do rio Curu dos anos de 1985 e 2004	58
Figura 20 - Erosividade espacializada na bacia hidrográfica do açude Pentecoste.....	59
Figura 21 – Erodibilidade do solo e sua classificação de acordo com Freire e Pessoti (1978) para a bacia hidrográfica do açude Pentecoste	64
Figura 22 - Fator topográfico da bacia hidrográfica do açude Pentecoste	66
Figura 23 - Vegetação na bacia hidrográfica do Açude Pentecoste	67

Figura 24 – Classificação do grau de erosão na bacia hidrográfica do açude Pentecoste de acordo com a Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura (FAO) ...	68
Figura 25 - Relação ente a capacidade de armazenamento e o coeficiente de retenção de Brune	69
Figura 26 – Divisão da bacia hidrográfica do Açude Pentecoste em 26 sub-bacias	71
Figura 27 – Relação entre o percentual do assoreamento por classe com o percentual de área das sub-bacias e área acumulada das sub-bacias	75
Figura 28 – Decaimento da capacidade de armazenamento na bacia e no açude Pentecoste ..	77

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Taxa de assoreamento por década para reservatórios do Ceará	29
Tabela 2 – Precipitação média na bacia hidrográfica do açude Pentecoste.....	31
Tabela 3 - Evaporação média na Estação de Pentecoste	32
Tabela 4 - Identificação e localização dos postos fluviométricos	33
Tabela 5 - Reservatórios monitorados na área de estudo	39
Tabela 6 - Código da ANA, nome e localização em UTM dos postos selecionados.	40
Tabela 7 - Classes de permeabilidade em relação à textura e condutividade hidráulica do solo	45
Tabela 8 - Classes de estrutura do solo.....	45
Tabela 9 – Volumes dos reservatórios levantados obtidos através do método da equação do tronco de cone e da equação de Molle.....	54
Tabela 10 - Classes de reservatórios da bacia hidrográfica do açude Pentecoste, com base na capacidade de armazenamento hídrico para os anos de 1985 e 2004.....	55
Tabela 11 - Volume armazenado por classe utilizando a área do ano em questão e a área máxima entre os anos analisados.....	57
Tabela 12 - Teor de matéria orgânica, granulometria e permeabilidade das amostras dos solos coletadas na bacia hidrográfica do açude Pentecoste	60
Tabela 13 – Classificação da permeabilidade e estrutura do solo dos pontos amostrados na bacia hidrográfica do açude Pentecoste.....	62
Tabela 14 - Erodibilidade e classificação nos pontos de amostragem da área em estudo.....	63
Tabela 15 - Informações para o calculo do fator topográfico na bacia hidrográfica do açude Pentecoste	65
Tabela 16 – Principais resultados da simulação de processos hidrossedimentológicos na bacia do açude Pentecoste para os cenários considerados (1 a 3), para os 54 anos de simulação (1957-2010).....	72
Tabela 17 – Taxa de assoreamento por década nos reservatórios monitorados da bacia do Pentecoste, para os 54 anos de simulação (1957-2010)	73
Tabela 18 – Principais resultados para os 54 anos de simulação (1957-2010) dos processos hidrossedimentológicos para diferentes classes de tamanho dos reservatórios (cenário 3)	73
Tabela 19 – Distribuição do sedimento por classe de reservatório	74
Tabela 20 – Distribuição do sedimento por classe de reservatórios em diferentes cenários....	75

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	14
1.1 Considerações Gerais	14
1.2 Objetivos.....	15
1.3. Estrutura da Dissertação	16
2. REVISÃO DE LITERATURA	17
2.1. Recursos hídricos.....	17
2.2. Rede de reservatórios de alta densidade	18
2.3. Erosão do solo	19
2.4. Equação universal de perda de solos – EUPS	21
2.5. Erosividade da chuva	22
2.6 Erodibilidade do solo.....	23
2.7 Declive e topografia	25
2.7.1 Comprimento de rampa	26
2.7.2 Declividade.....	26
2.8 Cobertura vegetal	26
2.9 Práticas conservacionistas	27
2.10. Assoreamento	27
2.11. Razão de aporte de sedimento (SDR)	29
3. MATERIAL E MÉTODOS	30
3.1 Caracterização da área	30
3.1.1. Localização.....	30
3.1.2. Características climáticas	31
3.1.2.1. Pluviometria	31
3.1.2.2. Evaporação	32
3.1.3. Dados fluviométricos	33
3.1.4. Solos	34
3.1.5. Vegetação	35
3.2 Caracterização dos reservatórios	36
3.2.1. Identificação dos reservatórios	36
3.2.2. Estimativa do volume armazenado	37
3.3. Perda de solo	39
3.3.1. Erosividade da chuva – Fator R	40

3.3.2. Erodibilidade do solo – Fator K	41
3.3.2.1. Análise granulométrica.....	43
3.3.2.2. Permeabilidade do Solo	44
3.3.2.3. Estrutura do solo.....	45
3.3.2.4. Teor de matéria orgânica	46
3.2.3. Fator topográfico – LS	46
3.2.4. Cobertura vegetal – fator C	47
3.2.5. Práticas conservacionistas – fator P	48
3.2.6. Erosão localizada.....	48
3.3. Balanço e propagação de sedimento	48
3.3.1. Assoreamento na bacia.....	48
3.3.2. Eficiência de retenção dos reservatórios	49
3.3.3. Massa específica aparente do sedimento.....	50
3.3.4. Propagação de sedimentos	50
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	53
4.1. Levantamento da açudagem.....	53
4.2. Erosividade da chuva – fator R.....	58
4.3. Erodibilidade do solo – fator K	60
4.4. Fator topográfico – LS	65
4.5. Fator cobertura vegetal – C.....	66
4.6. Erosão localizada	67
4.7. Produção de sedimentos e retenção nos reservatórios	69
4.8. Assoreamento	70
4.8.1. Cenários baseados no detalhamento do sistema.....	70
4.8.2. Cenários baseados em alteração do sistema.....	75
4.8.3. Variabilidade na capacidade de armazenamento do sistema	76
CONCLUSÕES.....	78
REFERÊNCIAS	79

1. INTRODUÇÃO

1.1 Considerações Gerais

A disponibilidade e usos da água na região Nordeste do Brasil, particularmente na região semiárida, continuam a ser uma questão crucial no que diz respeito ao seu desenvolvimento. É fato que grandes esforços vêm sendo empregadas com o objetivo de implantar infra-estruturas capazes de disponibilizar água suficiente para garantir o abastecimento humano e animal e viabilizar a irrigação. No entanto, esses esforços ainda são, de forma geral, insuficientes para resolver os problemas decorrentes da escassez de água, o que faz com que as populações continuem vulneráveis à ocorrência de secas, especialmente quando se trata do uso difuso da água no meio rural (CIRILO *et al.*, 2010).

O conflito pela água já é uma realidade no Semiárido Brasileiro, nesta região que abrange uma área de aproximadamente um milhão de km², com uma população por volta de vinte milhões de habitantes. O abastecimento hídrico da região depende em grande parte das águas superficiais acumulada nos reservatórios, Araújo, (2003) cita o caso do Ceará, em que 93% da água ofertada aos usuários vêm das barragens.

As barragens do semiárido brasileiro conseguem regularizar apenas cerca de 40% da vazão afluente, os demais 60% são perdidos entre evaporação e extravasamento. Com o assoreamento a tendência geral é de aumento das perdas por evaporação, já que as relações cota - área - volume sofrem alterações, e das perdas por extravasamento, sendo que há redução da capacidade acumulativa dos reservatórios (ARAÚJO *et al.*, 2006).

A construção de uma barragem e a formação de seu reservatório normalmente modifica as condições naturais do curso d'água. Em relação ao aspecto sedimentológico, as barragens atenuam as velocidades da corrente provocando a deposição gradual dos sedimentos carregados pelo curso d'água, ocasionando o assoreamento, diminuindo gradativamente a capacidade de armazenamento do reservatório e podendo vir a inviabilizar sua operação, além de ocasionar problemas ambientais de diversas naturezas (CARVALHO *et al.*, 2000).

Os danos ambientais e econômicos devido à acumulação de sedimentos nos reservatórios podem ser grandes e de extrema dificuldade de remediar, particularmente em regiões áridas e semi-áridas (ICOLD, 1989). O assoreamento é um problema sócio-econômico em longo prazo, pois reduz a capacidade de armazenamento de água, que por sua vez, pode ameaçar o abastecimento doméstico e as atividades econômicas como irrigação, produção de

energia elétrica, turismo costeiro, entre outros (LOPEZ-TARAZÓN ET AL 2009; MORRIS and FAN, 1997; MAMEDE, 2008).

A aceleração da erosão do solo e aporte de sedimentos finos subsequentes aos rios são duas das principais preocupações ambientais das autoridades em gestão da água e do solo em todo o mundo. A perda de solo é comumente associada à redução das terras aráveis, ocasionando assim uma redução no rendimento das culturas. Além dos efeitos *in loco*, o fornecimento de sedimentos fino conduz a graves impactos fora do local onde esses são gerados, podendo os sedimentos se acumularem no leito de dos rios aumentando potencialmente o risco de inundações, ou diminuir a capacidade de armazenamento do reservatório, e degradam os ecossistemas aquáticos, aumentando a turbidez da água e da mobilização de contaminantes associados(DUVERT, GRATIOT *et al.*, 2010).

1.2 Objetivos

O objetivo geral dessa dissertação é analisar os impactos da densa rede de reservatórios da bacia hidrográfica do açude Pereira de Miranda (também conhecido como açude Pentecoste) na produção de sedimentos e na capacidade de armazenamento hídrico da mesma.

Como objetivos específicos propõem-se:

- Identificar e caracterizar os reservatórios da bacia usando imagens de satélite;
- Estimar a produção de sedimentos na bacia, identificando áreas potencialmente produtoras;
- Aplicar um modelo simplificado para simular a propagação do sedimento pela densa rede de reservatórios da bacia;
- Analisar o assoreamento do reservatório Pentecoste considerando diferentes cenários de estrutura do sistema.

1.3. Estrutura da Dissertação

Além deste primeiro capítulo de introdução, que discorre sobre a problemática da erosão e os danos causados por ela, seguido dos objetivos a serem atingidos, esta dissertação está estruturada em mais quatro capítulos. O segundo apresenta uma base conceitual, ou seja, a revisão de literatura sobre o tema: densas redes de reservatórios, erosão e assoreamento. No terceiro capítulo são descritos os materiais e métodos utilizados para o desenvolvimento da pesquisa. No quarto capítulo são apresentados os resultados deste estudo, com estimativa do volume armazenado na bacia hidrográfica, da erosão localizada, do assoreamento na bacia hidrográfica considerando diferentes cenários de estrutura do sistema, além da discussão acerca destes. Por fim, o quinto capítulo apresenta as conclusões e recomendações acerca deste trabalho.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Recursos hídricos

A água é o insumo básico para a sobrevivência de todas as espécies e um indicador do desenvolvimento de uma região, sendo necessária atenção especial com seu manejo visando sua conservação, qualidade e quantidade (ANEEL, 2001).

De toda água existente em nosso planeta, cerca de 97,5% é de água salgada e apenas 2,5% doce. A maior parte da água doce (68,7%) está armazenada nas regiões polares e 30,1% se encontram em reservatórios subterrâneos. A água de rios e lagos, mais acessíveis ao uso humano, correspondem a apenas 0,27% do volume total de água doce da terra (Fietz, 2006). A água é, portanto, um recurso extremamente reduzido (TUNDISI, 2003).

A escassez da água está se tornando um problema cada vez mais significativo para muitos países, projeta-se para o ano de 2025 que uma parcela significativa da população mundial sofrerá com a escassez desse recurso tanto física quanto econômica (CHARTRES; WILLIAMS, 2006).

Tundisi (2003) afirma ainda que de 1900 a 2000 o uso total da água no planeta aumentou em dez vezes (de 500 km³/ano para aproximadamente 5.000 km³/ano). Para a mesma época Lima (2001) diz que a população mundial cresceu quatro vezes, enquanto o consumo de água cresceu sete vezes.

O Brasil tem uma posição privilegiada perante a maioria dos países quanto ao seu volume de recursos hídricos. Porém, mais de 73% da água doce disponível no país encontra-se na bacia Amazônica, que é habitada por menos de 5% da população. Então, apenas 27% dos recursos hídricos brasileiros estão disponíveis para 95% da população (SETTI *et al.* 2000, FIETZ, 2006). Como em outros países, a maior demanda por água no Brasil é na agricultura, especialmente para a irrigação, com quase 63% de toda a demanda (REBOUÇAS, 2003).

Nos sertões do Nordeste brasileiro, a falta de água é o principal obstáculo para a sobrevivência dos agricultores e animais. A vulnerabilidade a que esta região está exposta é decorrência da instabilidade climática, dramatizada pelos períodos de seca que ocorrem, em média, a cada cinco anos (CRUZ *et. al.*, 1999).

O semiárido brasileiro tem seu desenvolvimento sócio-econômico substancialmente prejudicado devido à sua elevada irregularidade pluviométrica, espacial e temporal, bem como pela ocorrência periódica de secas de média e longa duração (ÁRIDAS, 1994).

As secas mais recentes foram responsáveis pela redução de 9% no produto da agropecuária regional e de 4,5% no PIB, com uma população atingida na ordem de 12 milhões de habitantes, dos quais, 2 milhões foram inscritos nas frentes de emergências de trabalho (CRUZ *et. al.*, 1999).

A irregularidade temporal e espacial das chuvas no Nordeste brasileiro é agravada ainda pela pouca profundidade de seus solos. Torna-se então imprescindível a construção de açudes para disponibilizar sua utilização para o consumo humano, animal e também para a produção de alimentos (ÁRIDAS, 1994).

2.2. Rede de reservatórios de alta densidade

A sustentabilidade das comunidades, a agricultura e a indústria dependem fortemente de armazenamento e fornecimento eficaz de recursos hídricos. Em algumas regiões, o crescimento econômico levou a um nível de demanda de água, que só pode ser obtido através de redes de reservatórios eficientes (LYRA *et al.*, 2010). Desta forma a construção de reservatórios para armazenamento de água torna-se cada vez mais necessária a fim de atender a crescente demanda das populações (MARINS *et al.*, 2004). Visando-se atender ao abastecimento hídrico, é muito comum que as bacias abriguem redes de alta densidade de reservatórios (MAMEDE *et al.*, 2009).

Para superar o problema da baixa disponibilidade hídrica e da alta demanda por esse recurso devido à grande densidade populacional, as autoridades têm construído milhares de pequenos reservatórios. Estes reservatórios possibilitam o armazenamento da água durante o período chuvoso, para disponibilizar o recurso durante a estação seca. A maioria destes reservatórios foram construídos sem um plano integrado, e isso levou a um sistema caótico e extremamente difícil de controlar - chamada rede de reservatórios de alta densidade, HdRN (PETER, 2011).

Sousa *et al.*, (2010) estudando a variabilidade espacial da disponibilidade hídrica superficial de uma bacia hidrográfica localizada no semiárido nordestino, observaram uma alta densidade de reservatórios, porém com baixa capacidade de armazenamento, fato esse explicado pela construção de grande quantidade de reservatórios de pequeno porte, que, apesar de possibilitarem uma boa distribuição espacial da disponibilidade hídrica, podem ser hidrologicamente ineficientes.

Mamede *et al.*, (2009), realizando simulações de retenção hídrica e de sedimentos pelos reservatórios de montante da bacia hidrográfica do Benguê – CE com alta densidade de

reservatórios, verificaram que em anos extremamente úmidos (no caso o ano de 2004) a retenção hídrica pelos pequenos reservatórios representou apenas um percentual de 11%, já para anos de pluviometria normal, a retenção hídrica nos reservatórios de montante, apresentou valores por volta de 40% do volume de água que chegaria ao açude principal.

Mamede *et al.* (2009) enfatizam a importância dessa densa rede de reservatórios devido à espacialização dos recursos hídricos ao longo da bacia, como também pela retenção hídrica, dos reservatórios de montante, de uma parcela significativa do escoamento gerado na bacia. Esta retenção hídrica, por um lado, permite uma melhor distribuição espacial dos recursos hídricos, favorecendo seu uso pelas comunidades circunvizinhas.

Araújo *et al.*, (2010) avaliaram o impacto de uma densa rede de reservatórios na disponibilidade hídrica em uma bacia hidrográfica (Bacia do Alto Jaguaribe) localizada no semiárido nordestino, e verificaram que as densas redes de reservatórios é uma realidade no semiárido Nordeste, sendo que a mesma possui impactos positivos e negativos na disponibilidade de água.

Araújo *et al.* (2010) dizem que a literatura não menciona redes igualmente densas em outra região do globo (semiárida ou não). Os resultados dessa pesquisa mostraram que os principais impactos negativos dessa rede de reservatórios de alta densidade são a alta evaporação a partir dos reservatórios superficiais (o que leva à redução da disponibilidade hídrica) e a crescente complexidade do sistema de gestão. A rede de reservatórios de alta densidade também apresentou impactos positivos, entre eles a melhor distribuição dos recursos hídricos, permitindo que a população difusa seja beneficiada; racionalidade energética, uma vez que o centro de gravidade da oferta de água é maior do que seria sem a densa rede; e retenção de sedimento, que resulta em uma menor taxa de assoreamento das barragens estratégicas.

De acordo com Sousa *et al.* (2011), os pequenos reservatórios garantem uma redução significativa na quantidade de sedimentos que são responsáveis pela diminuição da capacidade de armazenamento dos reservatórios estratégicos.

2.3. Erosão do solo

De acordo com Zachar (1982) o termo erosão tem origem do latim, derivado do verbo *erodere* (escavar). Já nas ciências ambientais, trata-se do desgaste e/ou arrastamento da superfície da terra pela água, vento, gelo ou outros agentes geológicos, incluindo processos como o arraste gravitacional. A erosão é um dos principais fenômenos geológicos que ocorre

na Terra e se processa de várias formas, se considerado o seu ambiente de ocorrência (SILVA *et al.*, 2003).

Para Bertoni e Lombardi Neto (1990), o processo erosivo consiste no desprendimento e arraste acelerado das partículas do solo causado pela água e pelo vento. Esse é um processo de trabalho físico onde o consumo de energia é usado em todas as fases da erosão (rompimento dos agregados, salpicamento das gotas de chuva, turbulência da enxurrada e no escorrimento e transporte das partículas).

Em grande parte do nosso planeta a erosão hídrica é a principal forma de erosão (Zachar, 1982). Esta é causada pela ação da chuva e pelo escoamento superficial, sendo afetada por um grande número de agentes naturais e antropogênicos. A erosão hídrica pode ser expressa como a relação existente entre a erosividade da chuva, ou seja, o potencial que a chuva tem em causar erosão, e a erodibilidade do solo, que por sua vez é a suscetibilidade do solo à erosão (BERTONI; LOMBARDI NETO, 1990; SILVA *et al.*, 2003).

No Brasil, a erosão hídrica é o principal fator capaz de tornar insustentáveis os sistemas de produção agrícola e os impactos ambientais dela oriundos têm reflexos no aumento dos custos, causando anualmente um grande prejuízo econômico ao País (HERNANI *et al.*, 2002).

Segundo Wünsche e Denardin (1980) o impacto da gota de chuva no solo descoberto é responsável por 95% da erosão, ou seja, a ação erosiva da chuva é muito maior quando o solo está descoberto. Quando a cobertura do solo atinge níveis próximos a 80%, as perdas de solo são insignificantes.

Guerra (1995) cita diferentes formas de como a erosão pode se manifestar:

- a) A erosão laminar que é caracterizada pelo escoamento superficial da água, e se distribui pelas encostas de forma dispersa, não se concentrando em canais;
- b) A erosão em ravinas é aquela formada quando a velocidade do fluxo de água aumenta na encosta, tornando o fluxo turbulento, muitas vezes não tem conexão com a rede de drenagem;
- c) A erosão em voçorocas pode ocorrer a partir da formação de túneis na subsuperfície com posterior colapso da superfície situada acima ou, a partir do alargamento e aprofundamento de uma ravina na medida em que esta evolui para um canal de água permanente.

Cunha (2006) ressalta a importância de se observar a erosão acelerada, porque esta é um processo que age com rapidez e acarreta grandes prejuízos para as atividades econômicas e para o meio ambiente. Além do empobrecimento do solo pela perda de

nutrientes e matéria orgânica, há a contaminação dos cursos d'água, porque a água que não infiltra carrega o material do solo e os resíduos dos produtos químicos usados no preparo e manejo do solo.

Farias (1984) ressalta a importância de se identificar lugares onde a erosão se encontra mais avançada, visando assim, definir medidas de correção e proteção ao meio; planejar mudança de uso do solo; evitar prejuízos sobre as obras. É importante, portanto, dimensionar nos estudos a erosão atual e a erosão potencial (susceptibilidade à erosão).

Neste contexto, a erosão acelerada dos solos coloca-se como um dos principais desencadeadores da degradação de terras e um dos maiores impactos causados pela atividade agrícola, uma vez que contribui para a diminuição do potencial produtivo dos solos, bem como para o assoreamento e decréscimo da qualidade dos recursos hídricos (LAL, 1988).

2.4. Equação universal de perda de solos – EUPS

Em decorrência da preocupação ambiental, muitos modelos matemáticos estão sendo desenvolvidos para descrever e prever a ocorrência de processos erosivos. Esses modelos usam expressões matemáticas que representam os diversos fatores presentes na paisagem: topografia, variáveis meteorológicas, propriedades dos solos e práticas conservacionistas. Esses modelos podem ser divididos em dois grupos: o dos modelos empíricos e o dos modelos baseados em processos que consideram as leis físicas e buscam uma maior compreensão dos diferentes sub processos presentes e suas inter-relações (FARINASSO *et al*, 2006).

Os mesmos autores afirmam que os modelos empíricos são os mais usados no planejamento conservacionista devido a sua simplicidade e a disponibilidades de dados. Dentre os modelos empíricos, a Equação Universal de Perdas de Solos – EUPS (WISCHMEIER; SMITH 1965) é a que possui maior divulgação em estudos de predição de perdas de solos.

Silva *et al.* (2003) afirmam que a elaboração e aplicação de modelos matemáticos em estudos de erosão vêm sendo um recurso amplamente utilizado para melhor compreender este processo. Ao mesmo tempo, a aplicação de técnicas de geoprocessamento tem colaborado fortemente no sentido de agilizar a obtenção de resultados, possibilitando ainda, investigar o processo considerando-se situações hipotéticas.

A EUPS exprime a ação dos principais fatores que sabidamente influenciam as perdas de solo pela erosão hídrica, trata o assunto de modo mais dinâmico, por superar

parcialmente restrições climáticas e geográficas e ter aplicação generalizada (SILVA *et al.*, 2005; WISCHMEIER *et al.*, (1971),).

Apesar de a EUPS ter sua utilização para pequenos talhões, compatível com o uso agrícola, ela pode ser empregada em grandes áreas ou em escalas regionais, permitindo avaliar qualitativamente e geograficamente as áreas de diferentes graus de susceptibilidade à erosão (FARINASSO *et al.*, 2006).

2.5. Erosividade da chuva

O agente responsável pela energia necessária para a ocorrência da erosão hídrica é a chuva, tanto pelo impacto direto das gotas sobre a superfície do solo quanto pela sua capacidade de produzir o escoamento superficial (PRUSKI, 2009; BAZZANO *et al.*, 2010; CREPANI *et al.*, 2004).

De acordo com Guerra (1999), no momento em que as gotas de chuva atingem o solo inicia-se o efeito *splash*, também conhecido como erosão por salpicamento, o qual se trata do estágio inicial do processo erosivo, em que as partículas que compõem o solo são preparadas para serem transportadas pelo escoamento superficial. Essa preparação se dá tanto pela ruptura dos agregados, como pela própria ação transportadora que o salpicamento provoca nas partículas. O efeito *splash* pode variar em função da resistência do solo ao impacto das gotas da chuva e da energia cinética provocada por elas, que, em função de sua intensidade provocarão a ruptura dos agregados.

Os primeiros estudos para se obter uma equação para determinar energia cinética das gotas da chuva foram realizados por Wischmeier e Smith (1958). Os autores propuseram um índice de erosividade da chuva denominado EI_{30} , que é definido como o produto da energia cinética da chuva pela intensidade máxima ocorrida num período de 30 minutos consecutivos.

Para as regiões de clima temperado, o índice EI_{30} é o que tem fornecido melhores resultados para avaliar a erosividade da chuva. Já em regiões de clima tropical e subtropical Hudson (1973) e Lal (1988) observaram que o uso do índice EI_{30} não tem proporcionado bons resultados na estimativa de perdas de solo, e propõem uma metodologia alternativa para essas regiões denominada $KE > 25$. Este índice é a soma da energia cinética dos segmentos da chuva com intensidade superior a 25 mm.h^{-1} .

Para grande parte do Brasil existe carência temporal e espacial de dados pluviográficos que permitiriam a avaliação exata da erosividade da chuva, enquanto que

informações meramente pluviométricas são relativamente mais abundantes. Esses fatores, associados à morosidade do cálculo da erosividade, fizeram com que muitos pesquisadores tentassem relacionar os índices de erosividade da chuva (EI₃₀ ou KE>25) com suas características pluviométricas (BERTONI e LOMBARDI NETO, 1990).

As características pluviométricas mais comumente associadas com a erosividade são a altura de precipitação e o coeficiente de chuva (Fournier, 1960). Dessa forma, diversos trabalhos têm possibilitado a estimativa do fator R conhecendo-se apenas a quantidade diária precipitada (LAL, 1988; MORAIS *et al.*, 1988; MORAIS *et al.*, 1991; OLIVEIRA JÚNIOR; MEDINA, 1990).

Lombardi Neto e Moldenhauer (1992) desenvolveram uma equação para região de Campinas – SP, sendo que a mesma permite o cálculo da erosividade de chuva mesmo que não haja dados contínuos de precipitação, permitindo assim o uso da EUPS, tendo ainda sido desenvolvida para as condições brasileiras. Essa equação mostrou-se adequada também para o semiárido em análises multianuais (ARAÚJO, 2003).

2.6 Erodibilidade do solo

A erodibilidade do solo é considerada como a facilidade com que o solo é destacado pela ação da gota de chuva durante um evento de precipitação ou pelo escoamento superficial ou por ambos. É considerado, geralmente, como uma propriedade inerente do solo com um valor constante para um determinado tipo de solo, e amplamente adotada como um fator importante em modelos de previsão de erosão do solo (ZHANG *et al.*, 2008).

A avaliação da erodibilidade dos solos pode ser realizada por meio de estudos geológico-geotécnicos que serão utilizados para compor um diagnóstico correto dos mecanismos responsáveis pelo surgimento e pela evolução da erosão e, desta forma, propor medidas preventivas ou corretivas eficientes do processo erosivo (AVILA *et al.*, 2010).

De acordo com Bastos (1999) a erodibilidade é uma das características mais complexas devido ao grande número de fatores físicos, químicos, biológicos e mecânicos intervenientes. Para Lal (1994) a distribuição e tamanho das partículas, estabilidade estrutural, teor de matéria orgânica do solo, granulometria e permeabilidade do solo influenciam sua erodibilidade.

O fator de erodibilidade do solo (K) da equação universal de perda de solo USLE (Wischmeier e Smith, 1978) é a medida mais usada da suscetibilidade do solo à erosão de sulcos. Este fator é definido como a taxa de perda de solo por unidade de erosividade medidos

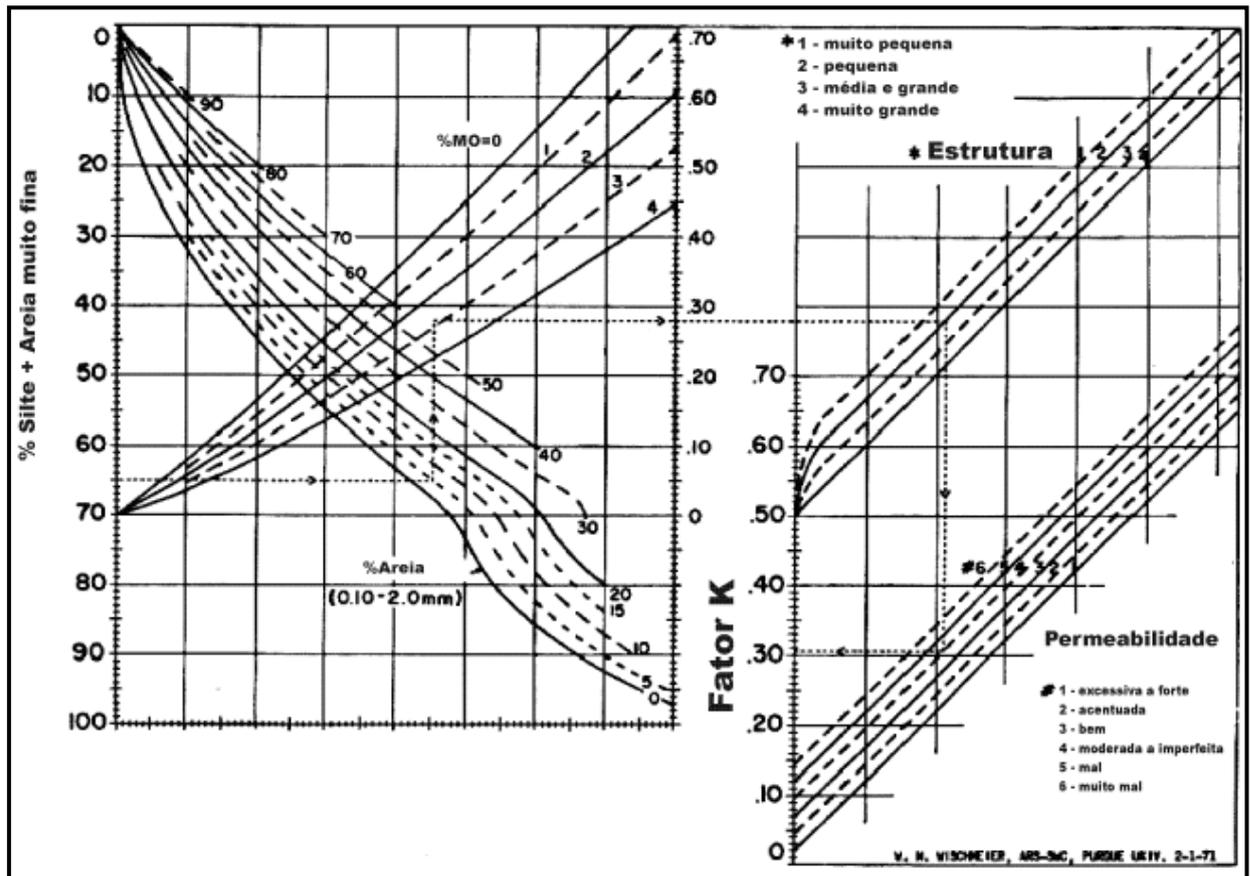
em um lote padrão de 22,1 m de comprimento, com uma inclinação de 9% que é mantido sem cobertura vegetal e submetido às práticas culturais normais (PRUSKI, 2009).

Em relação às pesquisas sobre erosão no Brasil, a erodibilidade do solo ainda é o parâmetro de maior custo e morosidade para determinação, devido à grande extensão do território e da diversidade de solos no país.

Para determinar a erodibilidade do solo existem três diferentes maneiras. A primeira é a determinação do fator K em condições de campo, sob chuva natural, porém, este método é muito caro e demorado. O segundo método é parecido com o primeiro, porém baseia-se na determinação do fator K sob condições de chuva simulada. Estes dois métodos são considerados padrões e refletem a erodibilidade do solo como é preconizada pela Equação Universal de Perdas de Solo (EUPS) (Wischmeier e Smith, 1978). O terceiro método baseia-se em regressões múltiplas que contenham como variáveis independentes atributos morfológicos, físicos, químicos e mineralógicos do solo ou relações destes, correlacionados com o fator K obtido pelos métodos padrões.

O primeiro método para estimar a erodibilidade do solo usando regressões foi desenvolvido por Wischmeier *et al.* (1971), o qual consiste na representação gráfica baseada na combinação das propriedades físicas do solo como por exemplo, percentagem de silte e areia muito fina, percentagem de areia, estrutura do solo e classe de permeabilidade, e também da fração de matéria orgânica (Figura 1) (PRUSKI, 2009).

Figura 1 - Nomograma de Wischmeier para cálculo da erodibilidade dos solos



Fonte: Pruski, 2009

2.7 Declive e topografia

Dos fatores da EUPS, o fator topográfico (LS) destaca-se como um dos principais responsáveis pelas perdas de solo. Ele representa o efeito combinado do comprimento de rampa e grau de declive da encosta. O entendimento das formas da paisagem pode auxiliar na identificação das rotas preferenciais dos fluxos de água, como também no entendimento da variabilidade espacial das propriedades do solo (SOUZA, 2001; ROCHA *et al.*, 1996).

Em vários trabalhos que utilizam geoprocessamento na determinação dos fatores da EUPS, o fator comprimento de rampa (L) e o fator declividade (S) aparecem associados. Essa associação pode ser feita por meio da equação desenvolvida por Bertoni para a cidade de Campinas, mas que se adéqua bem às condições brasileiras (BERTONI *apud* CARVALHO, 1994). Bertoni e Lombardi Neto (1990) desenvolveram uma equação para estimar o fator topográfico, que depende do comprimento da vertente L_R , em m; e da declividade (S_R), em porcentagem.

Os fatores L e S têm sido pesquisados separadamente, no entanto, para aplicação prática, é mais conveniente considerá-los como um fator topográfico (LS) (BUENO *et al.*, 2011).

2.7.1 Comprimento de rampa

As variações das superfícies geomórficas e as formas do relevo têm influência direta no processo de erosão e deposição de solos nas paisagens. Este fato está associado principalmente à inclinação da declividade e à curvatura do terreno (SOUZA *et al.*, 2003).

O comprimento de rampa (L_R) tem grande importância na perda de solo, já que, quanto maior for a sua extensão, maior será a velocidade do escoamento (ALVES, 2000). Em alguns trabalhos, o L_R foi obtido por medições diretas em cartas topográficas ou pela razão entre a área da bacia (m^2) e o somatório de todos os seus cursos de água (m), conhecido como método do retângulo equivalente (VILELA; MATTOS, 1975 *apud* ALVES, 2000). Para Wischmeier e Smith (1978), o comprimento de rampa é referido como sendo a distância do ponto de origem do caimento da água até um canal definido.

2.7.2 Declividade

De acordo com Cunha (2006), o grau de declividade (S) influencia tanto na velocidade quanto no volume da enxurrada. Os processos de erosão em sulcos e entre sulcos são os mais afetados pela declividade das encostas, devido ao aumento da velocidade do escoamento.

O fator declividade é expresso em porcentagem e é caracterizado como a tangente do ângulo ou índice da inclinação do terreno (Wischmeier e Smith, 1978), podendo ser estimado por meio de Modelo Digital de Elevação (MDE); (BUENO *et al.*, 2011).

2.8 Cobertura vegetal

Quanto mais protegida estiver a superfície do solo pela cobertura vegetal da ação da chuva, menor será nela a propensão de ocorrência de erosão. Além de aumentar a quantidade de água interceptada, a vegetação amortece a energia de impacto das gotas de chuva, reduzindo a destruição dos agregados, a obstrução dos poros e o selamento superficial

do solo. A cobertura vegetal na superfície também reduz a velocidade do escoamento superficial pelo aumento da rugosidade hidráulica do seu percurso (PRUSKI, 2009).

Sem cobertura vegetal sobre a superfície, o solo estará totalmente exposto à erosão hídrica provocada pela ação da água da chuva. Os danos causados pela ação das gotas da chuva que golpeiam o solo em alta velocidade constituem o primeiro passo no processo da erosão (BERTONI; LOMBARDI NETO, 1990).

A proteção que uma cobertura viva confere ao solo tende a aumentar até que o crescimento das plantas se estabilize, enquanto que, para uma cobertura morta, o efeito protetor tende a diminuir conforme avança o tempo em função do processo de decomposição e de incorporação do material no próprio solo (SILVA, 2001). A cobertura vegetal (fator C), expressa o efeito combinado da proteção oferecida pela cobertura vegetal e os diferentes sistemas de manejo (WEILL; SPAROVEK, 2008).

O fator C varia de zero a um, aproximando-se de zero nos sistemas de manejo conservacionistas, e de um nos sistemas convencionais e não conservacionistas (BERTOL *et al.*, 2001).

2.9 Práticas conservacionistas

O fator P da equação universal de perda do solo é a relação entre a intensidade esperada de tais perdas com determinada prática conservacionista e a intensidade quando a cultura está plantada no sentido do declive (morro abaixo). As práticas conservacionistas mais comuns para as culturas anuais são: plantio em contorno, plantio em faixas de contorno, terraceamento e alternância de capinas (SOUTO, 1998).

No âmbito de uma microbacia ou de uma propriedade, ocorrem fatores que contribuem para intensificar os processos erosivos, tais como: sulcos abertos morro abaixo por veículos de transporte da produção, surgimento de nascentes ou intensificação das já existentes, por causa das chuvas, estradas construídas no sentido do aclave e pouca cobertura vegetal (MONEGATI, 1991 *apud* CUNHA, 2006).

2.10. Assoreamento

A construção de uma barragem e a formação do seu reservatório normalmente modificam as condições naturais do curso d'água. Em relação ao aspecto sedimentológico, as barragens atenuam as velocidades da corrente provocando a deposição gradual dos

sedimentos carregados pelo curso d'água, ocasionando o assoreamento, diminuindo gradativamente a capacidade de armazenamento do reservatório e podendo vir a inviabilizar a operação do aproveitamento, além de ocasionar problemas ambientais de diversas naturezas (CARVALHO *et.al.*, 2000).

Todos os reservatórios formados através do barramento de cursos d'água são susceptíveis ao processo de assoreamento. Em decorrência da construção de uma barragem, o nível da água se eleva, aumentando, também, a área da seção transversal, o que provoca a diminuição da velocidade do fluxo de água. Devido a este processo, parte do material, antes em suspensão, tende a se depositar, resultando no assoreamento do reservatório (MAIA; VILLELA, 2009).

O assoreamento dos reservatórios afeta o atendimento de demandas como: geração de energia elétrica, abastecimento urbano e industrial, irrigação, navegação fluvial, pesca, assimilação de esgotos, dentre outros. O processo de acúmulo de sedimento no reservatório, além de ser responsável pela redução de receita com a produção de energia elétrica, por exemplo, também pode ocasionar custos adicionais devido ao desgaste das turbinas por abrasão física, causada por areias, e abrasão química, pela má qualidade da água; além de investimentos em procedimentos de dragagem nas proximidades da tomada d'água. (MAIA; VILLELA, 2009).

Os sedimentos que se depositam pela influência do reservatório se estendem de montante a jusante, não se distribuindo uniformemente mesmo dentro do lago. A deposição de montante se denomina depósito de remanso, em referência ao fenômeno hidráulico. As deposições dentro do reservatório são chamadas de delta, depósito de margem e depósito de leito. O delta se forma com sedimentos grossos, enquanto que os depósitos do interior, com sedimentos mais finos. As enchentes produzem outro tipo de deposição, ocorrendo ao longo do curso d'água e do reservatório, formada por sedimentos mais finos e grossos e que é denominado depósito de várzea ou depósito de planície de inundação (CARVALHO *et al.*, 2000).

Vários estudos têm sido realizados para estimativa de assoreamento em reservatórios do semiárido usando modelos com base na EUPS, validados com informações de batimetria dos reservatórios, como os de Araújo (2003). Resultados deste trabalho podem ser encontrados na Tabela 1.

Tabela 1 – Taxa de assoreamento por década para reservatórios do Ceará

Reservatório	R (MJ.mm. ha ⁻¹ .h ⁻¹)	K (ton.h. MJ ⁻¹ .mm ⁻¹)	LS (-)	CP (-)	Erosão (ton.ha ⁻¹ .ano ⁻¹)	Taxa de assoreamento (%/década)
Acarape do Meio	8135	0.037	2.7	0.014	6.98	1.06
Canabrava	7347	0.032	1.8	0.058	19.94	1.21
Cedro	6828	0.020	1.9	0.192	71.91	1.77
São Mateus	6106	0.019	1.3	0.130	16.07	3.06
Várzea do Boi	6119	0.032	0.2	0.189	8.31	2.39
Várzea da Volta	9683	0.032	1.6	0.028	10.25	1.51
Santo Anastácio	9923 (4072)	0.013	2.0	0.039	35.69	3.57
Média	7734	0.026	1.6	0.093	24.16	1.83

Fonte: Adaptado de Araújo (2003)

2.11. Razão de aporte de sedimento (SDR)

Para que a EUPS possa ser aplicada em bacias hidrográficas, deve-se levar em consideração o conceito de razão de aporte de sedimentos (*Sediment Delivery Ratio* - SDR). A mesma é definida pela relação entre a produção efetiva e a produção bruta de sedimentos, sendo a produção efetiva de sedimentos caracterizada pelos sedimentos produzidos pela erosão que chegaram até a seção de referência da bacia (BRANCO, 1998).

A quantidade de sedimentos transportada pelos rios é relativamente pequena quando comparada com a quantidade de sedimentos erodidos na bacia hidrográfica (VESTENA, 2008; MIRANDA *et al.*, 2006)

Vestena (2008) diz que a SDR e a quantidade de sedimento transportado pelos rios são importantes para determinar o assoreamento na calha do rio e em reservatórios, assim como no entendimento da dinâmica dos processos hidrossedimentológicos na bacia hidrográfica.

Os modelos para estimar a taxa de transferência de sedimento são vários. Uns se fundamentam em dados observados (estatísticos ou empíricos) e outros em processos hidrológicos e sedimentológicos (paramétricos, distribuídos ou fisicamente baseados). De acordo com Khanbilvardi e Rogowski (1984) *apud* Araújo (2003) o valor médio de SDR é 25%, apresentando três formulações disponíveis na literatura: Maner, Roehl e Williams & Berndt, entre outros.

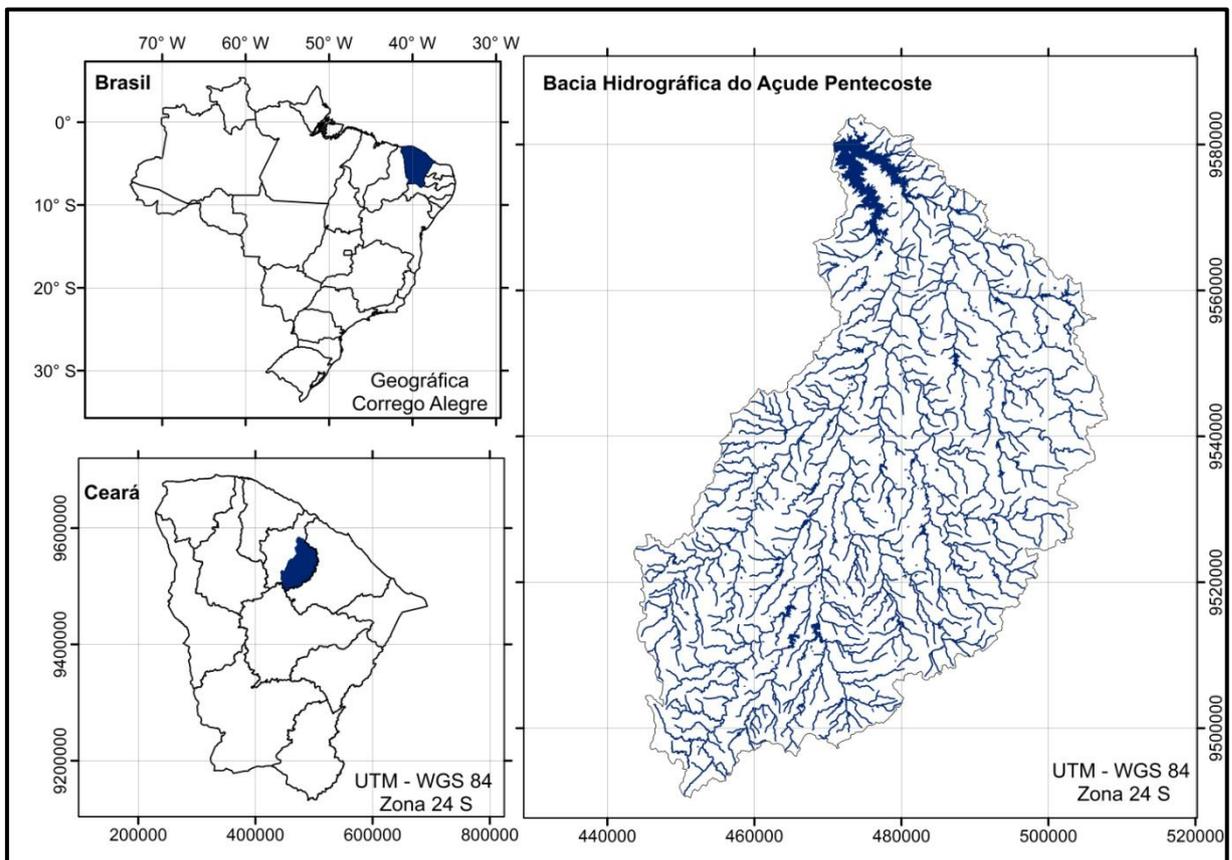
3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Caracterização da área

3.1.1. Localização

A bacia hidrográfica do Açude Pereira de Miranda - Pentecoste é uma sub-bacia do rio Canindé, localizado na região centro norte do estado do Ceará, pertencente à bacia do rio Curu. Dos 15 municípios que compõe a bacia do Curu, 12 fazem parte da bacia do Pentecoste, são eles: Apuiarés (28,3%), Aratuba (14,71%), Canindé (41,61%), Caridade (100%), Guaramiranga (16,9%), Itaitira (1,31%), Maranguape (5,95%), Mulungu (34,17%), Pacoti (5,33%), Palmácia (5,16%), Paramoti (41,48%), e Pentecoste (40%). Considerando o Sistema de coordenadas UTM (24 S, WGS 84 *datum*), a bacia do Pentecoste localiza-se entre as coordenadas 9480000 - 9590000 N e 440000 - 510000 E, com uma área de 3.230 km² aproximadamente (Figura 2).

Figura 2 – Hidrografia e localização da bacia hidrográfica do açude Pentecoste em relação ao Ceará e ao Brasil



O açude Pentecoste tem como finalidades: o controle das cheias do rio Canindé; a regularização de vazões do rio Curu; a irrigação das terras de jusante, coadjuvada pelas águas armazenadas na Barragem General Sampaio; a geração de energia elétrica; a piscicultura e o aproveitamento para culturas nas áreas de montante (CEARÁ, 2009).

A barragem do açude Pentecoste foi projetada e construída pelo Departamento Nacional de Obras Contra as Secas - DNOCS, entre os anos de 1950 e 1957. A barragem está inserida na bacia do Curu, que é caracterizada pelo alto nível de açudagem (CEARÁ, 2009).

A barragem Pentecoste detém cerca de 37% da água acumulada na bacia do Curu, possuindo seu uso predominante para irrigação (83%), indústria (7%) e o consumo humano (10%) (PLANERH, 2005). De acordo com Ceará (2009), na bacia há problemas decorrentes das plantações irregulares, uso de agrotóxicos, desmatamento e poluição nas margens dos rios (lavagem de carros, motos e animais), o que vêm causando assoreamento no rio e perda da qualidade de sua água.

3.1.2. Características climáticas

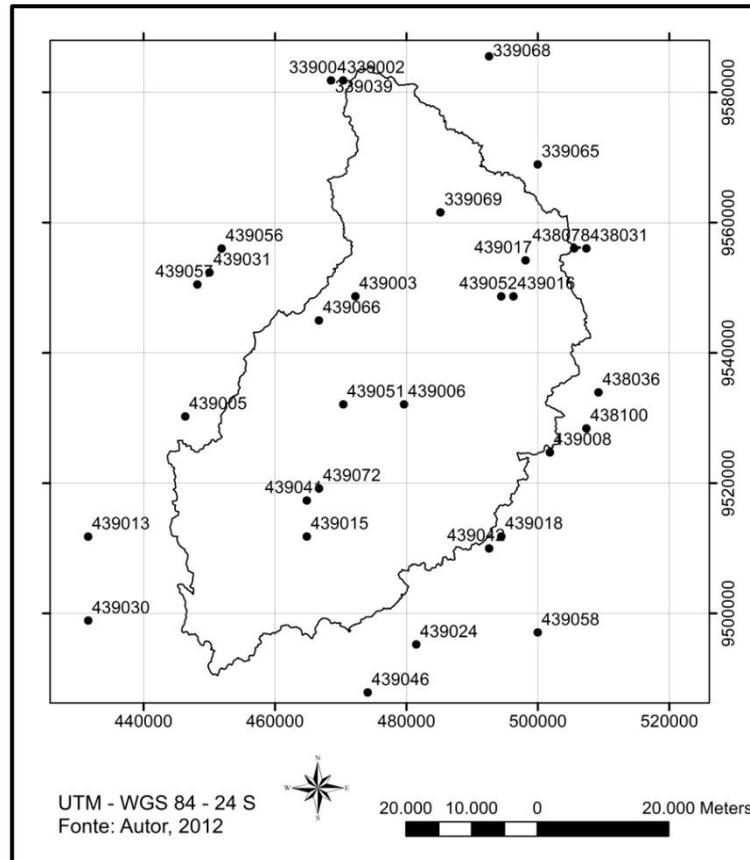
3.1.2.1. Pluviometria

Na Tabela 2 é apresentada a precipitação média da bacia hidrográfica do açude Pentecoste, a qual apresenta uma precipitação média anual de 853,55 mm, estimada a partir de 33 postos pluviométricos com dados significativos, ou seja, com registro de dados a partir de dez anos. Sua localização pode ser visualizada na Figura 3.

Tabela 2 – Precipitação média na bacia hidrográfica do açude Pentecoste

Pm	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
mm	81,32	113,94	204,04	198,02	116,88	63,27	31,80	9,22	4,33	4,49	5,53	20,72

Figura 3 - Localização dos Postos pluviométricos



3.1.2.2. Evaporação

A evaporação anual observada em tanque do tipo classe “A” é de 1.463,7 mm, distribuída ao longo dos meses segundo a Tabela 3 e Figura 4. O trimestre que apresenta os maiores valores de evaporação corresponde a agosto, setembro e outubro, ocorrendo o máximo em outubro (170,7 mm), e a mínima em março (63,7).

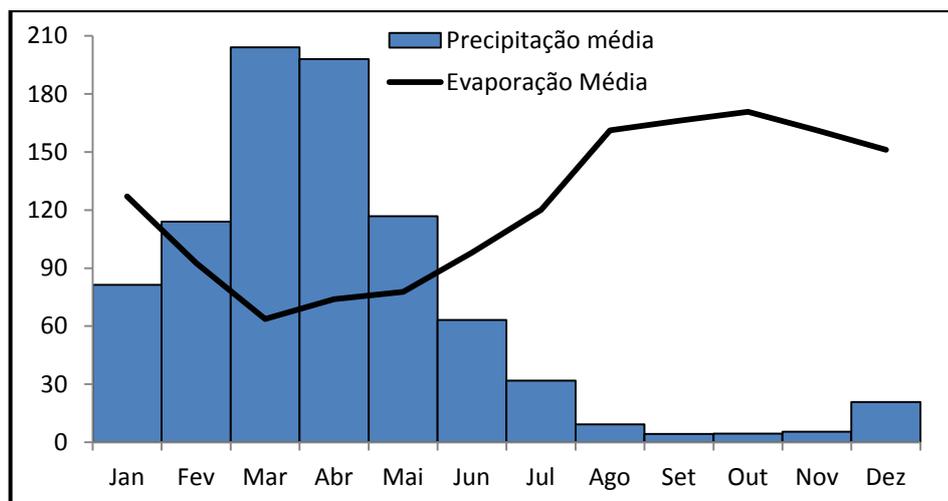
Tabela 3 - Evaporação média na Estação de Pentecoste

Evap.	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
mm	127,0	92,6	63,7	74,0	77,8	98,0	120,1	161,2	166,2	170,7	161,2	151,2

Fonte: Adaptado de Aguiar *et. al.*, 2004

A Figura 4 ilustra a precipitação e a evaporação na bacia hidrográfica do açude Pentecoste, onde é possível observar que nos meses de junho a janeiro a evaporação excede o valor precipitado na bacia.

Figura 4 - Precipitação média e evaporação média na bacia hidrográfica do açude Pentecoste



3.1.3. Dados fluviométricos

A bacia hidrográfica possui dez postos fluviométricos, sendo que oito desses estão localizados nos oito açudes monitorados pertencentes à bacia. A espacialização dos postos na bacia é mostrada na Figura 5 abaixo.

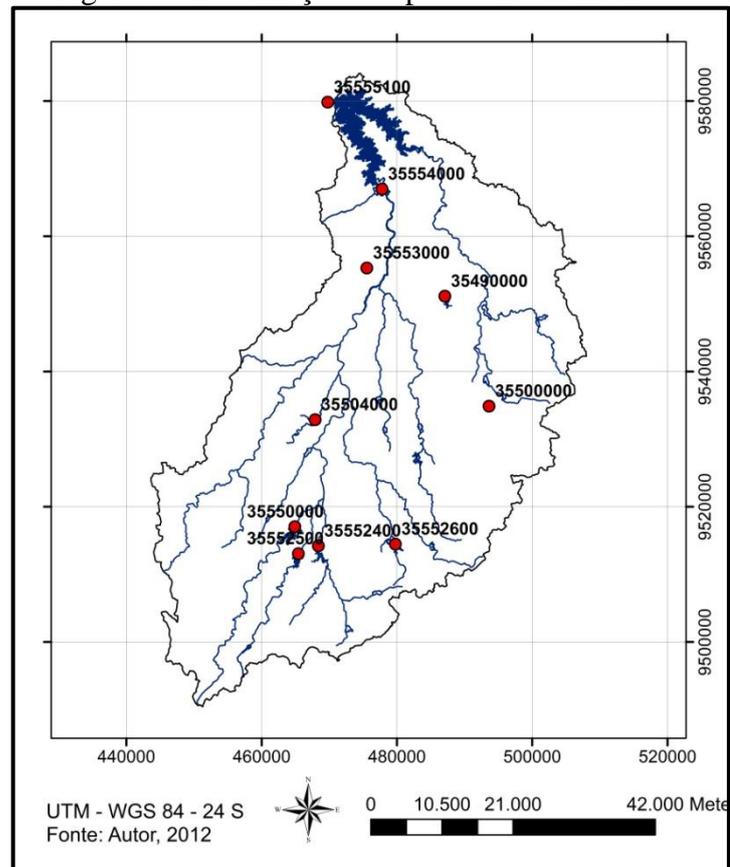
A Tabela 4 abaixo mostra o município em que cada posto está inserido, juntamente com o código da ANA (Agência Nacional de Águas), nome do posto e suas coordenadas geográficas.

Tabela 4 - Identificação e localização dos postos fluviométricos

Município	Posto	Nome	Latitude	Longitude
Canindé	35552500	Açude Salão	-4,4072	-39,3111
Canindé	35552400	Açude Souza	-4,3942	-39,2878
Canindé	35552600	Açude Caracas	-4,3911	-39,1878
Canindé	35550000	Açude São Mateus	-4,3714	-39,3192
Caridade	35504000	Açude São Domingos	-4,2283	-39,2875
Caridade	35500000	Açude Trapiá I	-4,2028	-39,0586
Caridade	35490000	Açude Desterro	-4,0589	-39,1133
Apuiarés	35553000	Fazenda Jacana	-4,0333	-39,2167
Pentecoste	35554000	Fazenda Erva Moura	-3,9167	-39,2
Pentecoste	35555100	Pereira de Miranda - Canal	-3,7833	-39,2667

Fonte: Adaptado da ANA, 2011

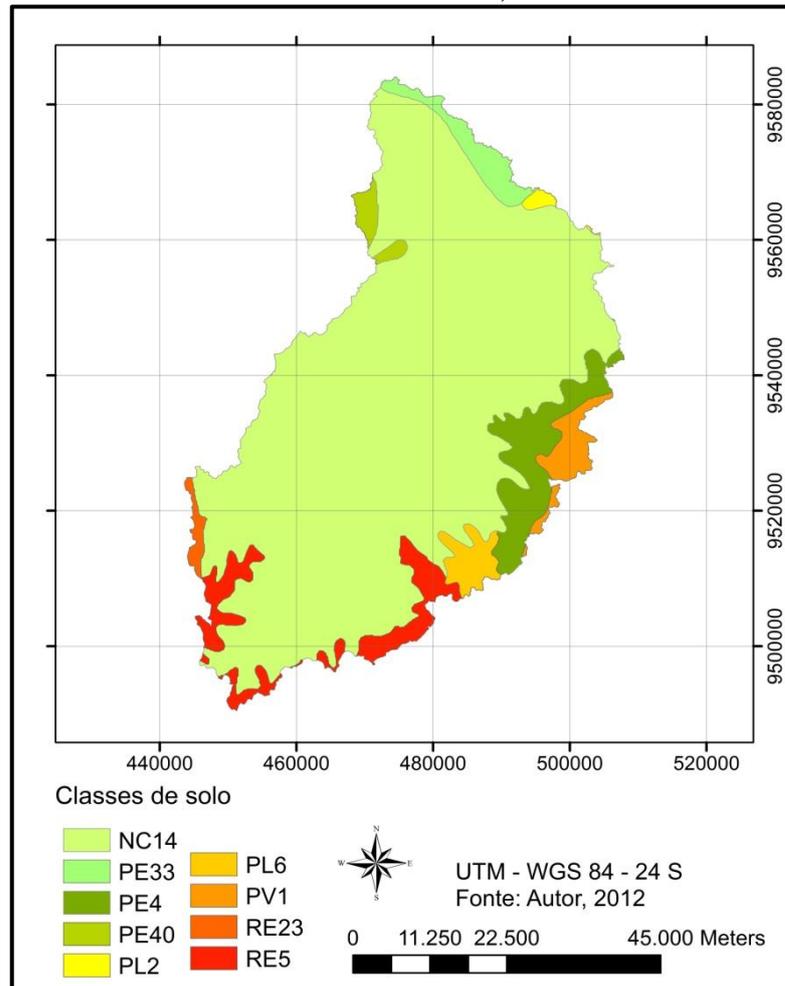
Figura 5 - Localização dos postos fluviométricos



3.1.4. Solos

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 nove diferentes tipos de solo dentro da bacia (Figura 6). Desses, a bacia apresenta um percentual de área de 82% do solo bruno não cálcico, 9% de podzólico vermelho amarelo equivalente eutrófico, 5% de solo litólico 2% de planossolo solódico e 2% de solo podzólico vermelho amarelo.

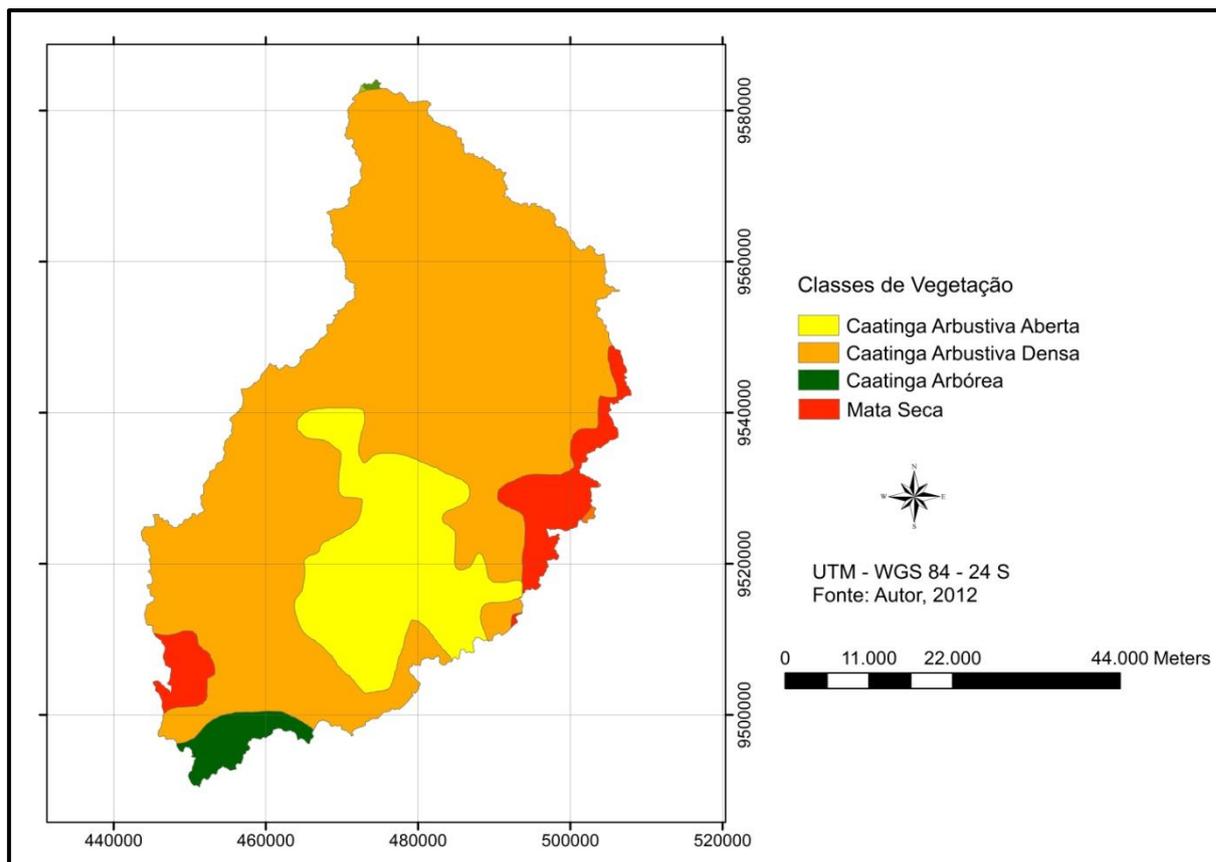
Figura 6 - Tipos de solo na bacia hidrográfica do açude Pentecoste de acordo com o mapa base de Reconhecimento dos solos no Estado do Ceará, na escala de 1:600.000



3.1.5. Vegetação

De acordo com o mapa das unidades fitoecológicas da Funceme, a bacia hidrográfica do Pentecoste possui quatro diferentes tipos de vegetação, entre eles caatinga arbustiva aberta, caatinga arbustiva densa, caatinga arbórea e mata seca. Destas, 74% são cobertas por caatinga arbustiva densa, aproximadamente 17% da área coberta por caatinga arbustiva aberta, 6% de mata seca e 2% de caatinga arbórea, como mostra abaixo a figura 7.

Figura 7 - Classes de vegetação existente na bacia hidrográfica do açode Pentecoste



3.2 Caracterização dos reservatórios

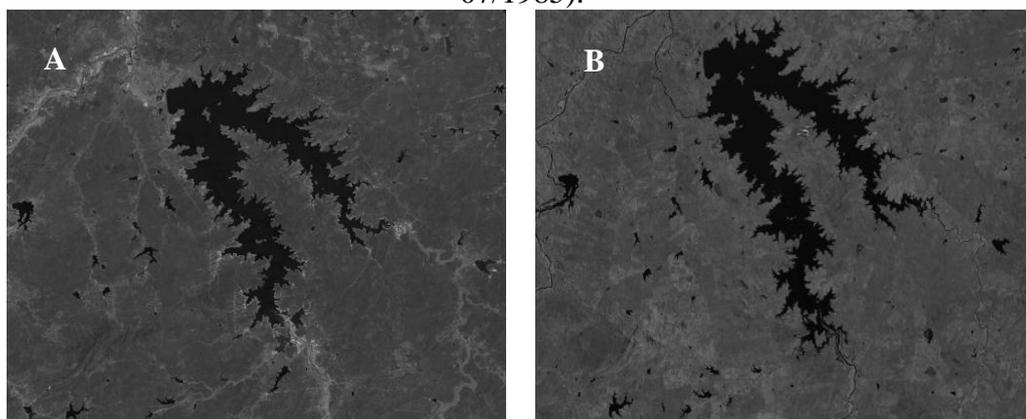
3.2.1. Identificação dos reservatórios

Para a quantificação e espacialização dos reservatórios, foram obtidas imagens de satélite dos períodos de julho 1985 e outubro de 2004 (Figura 8). As imagens utilizadas na pesquisa foram obtidas a partir do endereço eletrônico do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), e o satélite utilizado foi o LANDSAT 5, TM (*Thematic Mapper*), com resolução espacial de 30 m, para a obtenção do número de reservatórios e posterior verificação de sua evolução na bacia como também do aumento do volume armazenado na área estudada.

As imagens foram georreferenciadas usando o software SPRING 5.0, disponibilizado gratuitamente pelo INPE, para sua posterior utilização nos Sistemas de Informação Geográficos (SIG's). A técnica usada foi a *Bhattacharya* que é um classificador supervisionado por regiões, sendo o qual o algoritmo utiliza a distância de *Bhattacharya* para

medir a separabilidade estatística entre cada par de classe espectral, e a separabilidade é calculada através da distância média entre as distribuições de probabilidades de classes espectrais.

Figura 8 - Imagem LadSat 5, sensor: TM, detalhe do reservatório Pentecoste (A 10/2004, B 07/1985).



Fonte: Inpe, 2011

Devido às nuvens existentes nas imagens de 1985 foi necessário realizar um refinamento manual para eliminação dos objetos que não representavam os açudes. Após o refinamento da imagem, foi gerado um banco de dados contendo a área de cada reservatório nos períodos investigados.

3.2.2. Estimativa do volume armazenado

A estimativa do volume armazenado dos reservatórios iniciou com um levantamento da área e profundidade de dez reservatórios em campo, obtendo-se assim os parâmetros para calcular a cota-área-volume desses reservatórios. Adotou-se o método dos contornos, que consiste no levantamento do contorno dos reservatórios em diferentes períodos com suas profundidades associadas.

A área do reservatório (A_i) no dia da visita técnica foi estimada através de levantamento de pontos ao longo de seu contorno, utilizando um instrumento de posicionamento global (GPS-Garmin), de navegação com precisão média de 3 m. Já a área máxima do reservatório (A_{max}), por sua vez, foi obtida a partir do processamento de imagens do período de 1985, devido à ocorrência de grandes precipitações levando os reservatórios a alcançarem a área máxima.

A profundidade dos reservatórios (h_i) foi mensurada utilizando um profundímetro digital (Speedtech), e o desnível entre a superfície da água e a cota de soleira do vertedouro (Δh) com o auxílio de um nível óptico. Somando-se as duas alturas medidas ($h_i + \Delta h$) obtivemos a profundidade máxima do reservatório estudado (h_{\max}).

De posse dos valores de profundidade e áreas correspondentes, estimou-se o volume dos reservatórios a partir do emprego da fórmula de tronco de cone (Equação 1). O procedimento consiste no cálculo do volume do cone (V_i) representado pela altura h_i e área A_i . Em seguida calcula-se o volume máximo do reservatório (V_{\max}), como sendo a soma do volume V_i e o tronco de cone (ΔV) representado pelas áreas A_i e A_{\max} e pela diferença entre as alturas h_i e h_{\max} .

$$\Delta V = \frac{1}{3}(h_{\max} - h_i)(A_i + A_{\max} + (A_i \cdot A_{\max})^{1/2}) \quad (1)$$

em que:

$$V_{\max} = V_i + \Delta V \quad (2)$$

Para se comparar o volume obtido pela equação do tronco de cone, calculou-se um novo volume armazenado utilizando a Equação 3, proposta por Molle (1989) que foi desenvolvida com base nos dados de 416 reservatórios localizados na região semiárida do nordeste brasileiro, e relaciona área em m^2 e volume em m^3 do reservatório:

$$Volume = d \cdot \left(\frac{Área}{(c \cdot d)} \right)^{\frac{c}{(c-1)}} \quad (3)$$

em que, c e d são constantes empíricas descritas pela geometria do reservatório com valores médios de 2,7 e 1.500, respectivamente (MOLLE, 1989).

A fim de verificar a eficiência com a qual a equação de Molle simula os valores obtidos pela equação do tronco de cone, os volumes determinados por ambos os métodos foram analisados pelo coeficiente de Nash-Sutcliffe (NASH; SUTCLIFFE, 1970).

Na estimativa do volume armazenado para os reservatórios identificados no levantamento por imagem de satélites, realizou-se uma pesquisa sobre os reservatórios monitorados na área de estudo obtendo: nome, coordenadas, área e capacidade de armazenamento (volume máximo) (Tabela 5). Essas informações foram consideradas como as

reais e adotadas para esses reservatórios encontrados no levantamento de imagens. Para estimativa do volume máximo dos demais reservatórios levantados nas imagens, que não possuem nenhuma informação geométrica, foi utilizada novamente a equação de Molle. De posse desses dados, foi possível estimar capacidade máxima de armazenamento de água da bacia do reservatório Pentecoste.

Tabela 5 - Reservatórios monitorados na área de estudo

Nome	Área (ha)	Volume máximo (m ³)	Coordenadas	
			X	Y
Caracas	217,0	9.630.000	479.590	9.514.801
Desterro	170,9	5.010.000	487.218	9.551.345
Pentecoste	5.700,0	395.638.000	470.964	9.579.848
Salão	145,0	6.049.200	465.443	9.513.061
Sousa	400,0	30.840.000	468.654	9.514.529
São Domingos	-	3.035.000	468.500	9.533.429
São Mateus	35,0	10.340.000	464.918	9.517.037
Trapiá I	54,0	2.010.000	493.420	9.535.478

Fonte: SRH-CE, 2012

3.3. Perda de solo

Para se obter a erosão localizada na bacia utilizou-se a Equação Universal de Perdas de Solo (Equação 4), desenvolvida em região de clima temperado, nos Estados Unidos, mas amplamente aplicada no Brasil, como segue:

$$M_L = R.K.LS.C.P \quad (4)$$

Em que M_L é a perda média anual de solos, em ton.ha^{-1} ; R é a erosividade das chuvas ($\text{MJ.ha}^{-1}.\text{mm.h}^{-1}$); K é a erodibilidade dos solos ($\text{MJ.ha}^{-1}.\text{mm.h}^{-1}$); LS representa o fator topográfico (declividade e comprimento de rampa) (adimensional); C expressa o uso e manejo da terra e P representa as práticas conservacionistas (adimensionais).

A erosão localizada foi classificada de acordo com o grau de erosão proposto pela FAO (1980): baixa erosão a perda de solo abaixo de $10 \text{ t.ha}^{-1}.\text{ano}^{-1}$, moderada de 10 a $50 \text{ t.ha}^{-1}.\text{ano}^{-1}$, alta de 50 a $200 \text{ t.ha}^{-1}.\text{ano}^{-1}$ e muito alta perda de solo acima de $200 \text{ t.ha}^{-1}.\text{ano}^{-1}$.

3.3.1. Erosividade da chuva – Fator R

Para determinação da erosividade da chuva, selecionaram-se 33 postos pluviométricos dentro e no entorno da bacia. O critério para seleção desses postos foi a existência de séries históricas com registros de dados em período superior a dez anos. Para o preenchimento de eventuais falhas de dados pluviométricos foram feitas correlações de acordo com o posto pluviométrico mais próximo.

A Tabela 6 abaixo ilustra os postos pluviométricos selecionados para determinação da erosividade da chuva.

Tabela 6 - Código da ANA, nome e localização em UTM dos postos selecionados.

Código ANA	Nome	X	Y
439016	Açude Alto Alegre	496303,9	9548665
439015	Açude Salão	464863	9511805
439041	Açude São Mateus	464860,7	9517332
439066	Água Boa	466702,9	9544967
439018	Aratuba	494452,7	9511812
439072	Canindé	466712,9	9519178
439006	Caridade	479658,5	9532082
339068	Casa de Pedra	492593,7	9585506
339065	Comunidade Lemos	500000	9568926
439049	Esperança	464876,8	9480489
439024	Fazenda Feijão	481508,9	9495230
439056	Fazenda Morada Nova	451901,7	9556014
339045	Fazenda São João	454606,5	9563698
439017	Formosa	498146,3	9554192
439031	General Sampaio (Açude)	450050	9552332
438100	Guaramiranga	507401,6	9528392
439052	Inhuporanga	494450,3	9548665
438031	Itapebussu	507403,9	9556026
439030	Itatira	431588,7	9498895
439057	Jurema	448197,3	9550485
438078	Lagoa do Juvenal	505550,2	9556026
439008	Mulungu	501853,1	9524712
438036	Pacoti	509244,3	9533919
439058	Palmatória	500000	9497078
439010	Parafuso	427868,9	9528362
439003	Paramoti	472251,3	9548661
339004	Pentecoste	470387,1	9581821
339069	Providência	485202,3	9561552
439005	Salvação	446367,1	9530222

439051	São Domingos	470403,3	9532080
339028	São Luís do Curu	473074,9	9579147
439046	Targinos	474123,8	9487866
439013	Ubiraçu	431577,8	9511784

O fator R para cada ano foi calculado a partir das Equações 5 e 6, desenvolvidas por Lombardi Neto e Moldenhauer (1992).

$$R = \sum_{m=1}^{12} R_m \quad (5)$$

$$R_m = 67,355 \cdot \left(\frac{P_m^2}{P_a}\right)^{0,85} \quad (6)$$

Nas equações acima, P_m é a precipitação mensal (mm.mês^{-1}); P_a a precipitação média anual (mm.ano^{-1}); R_m a erosividade mensal da chuva ($\text{MJ.mm.ha}^{-1} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{mês}^{-1}$); R a erosividade anual ($\text{MJ.mm.ha}^{-1} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{ano}^{-1}$); e m o índice referente ao mês.

Em seguida foi gerado um mapa com os valores de erosividade da bacia, utilizando a ferramentas de geoprocessamento.

3.3.2. Erodibilidade do solo – Fator K

O fator erodibilidade do solo – K foi determinado pela equação 7, que foi a utilizada para construção do nomograma de Wischmeier *et al.* (1971).

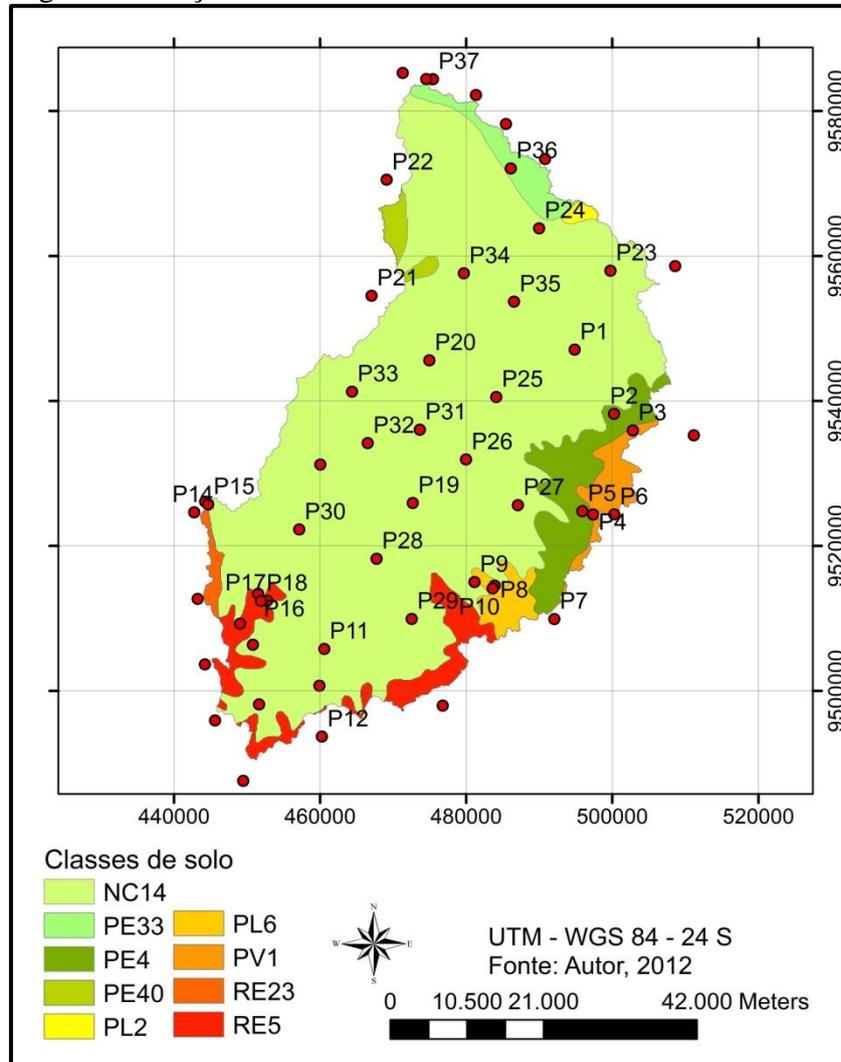
$$K = \frac{0,1317}{100} \{2,1 \cdot 10^{-4} \cdot (12 - m_o) \cdot [(sil + af) \cdot (100 - arg)]^{-1,14} + 3,25 \cdot (S_{1-2}) + 2,5 \cdot (P_1 - 3)\} \quad (7)$$

Em que: m_o é o percentual de matéria orgânica, sil é o percentual de silte presente no solo, arg é o percentual de argila que o solo contém, af é o percentual de areia fina presente na composição do solo, S_1 e P_1 são os parâmetros que descrevem a estrutura e a permeabilidade do solo respectivamente.

As manchas de solo que compõem a bacia hidrográfica do açude Pentecoste foram identificadas previamente utilizando o mapa exploratório de reconhecimento de solos do estado do Ceará, na escala de 1:600.000, e utilizando técnicas de geoprocessamento foram identificados nove diferentes tipos de solo. Previamente determinou-se a localização de 37 pontos (Figura 9), de forma a abranger toda a bacia e atingir todas as manchas de solo, para

posterior coleta de solo com o intuito de se investigar os atributos que determinam a erodibilidade do solo.

Figura 9 - Localização dos pontos amostrados para determinação da permeabilidade do solo na bacia hidrográfica do açude Pentecoste



Após a identificação das manchas de solo foi realizada coleta 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 10), para análise de granulometria e matéria orgânica. As amostras foram acondicionadas em sacos plásticos e levadas para o laboratório de mecânica dos solos e pavimentação da UFC, onde os ensaios foram conduzidos.

Figura 10 - Coleta de amostras de solo para determinação do fator de erodibilidade k



3.3.2.1. Análise granulométrica

Para análise granulométrica, as amostras foram preparadas de acordo com a NBR 6457 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 NBR 7181, 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 11). Nesta metodologia a fase de sedimentação é realizada após a defloculação química e mecânica das partículas.

Figura 11 - Análise granulométrica por sedimentação e peneiramento



3.3.2.2. Permeabilidade do Solo

A permeabilidade do solo foi determinada com amostras indeformadas de acordo com o método “A” da NBR 14545 de 2000 que dispõe sobre a determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos a carga variável (Figura 12).

Figura 12 - Permeâmetro de carga variável



A permeabilidade de cada amostra de solo foi calculada de acordo com a Equação 8 (NBR 14545):

$$k = \frac{aH}{A\Delta t} \ln\left(\frac{h_1}{h_2}\right) \quad (8)$$

Em que k é o coeficiente de permeabilidade expresso de forma exponencial, com dois algarismos significativos em $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$; Δt é a diferença entre os instantes t_1 e t_2 em s; h_1 é a carga hidráulica no instante t_1 , em cm; h_2 é a carga hidráulica no instante t_2 , em cm; a é a área interna da bureta de vidro, em cm^2 ; H é a altura inicial do corpo de prova, em cm; A é a área inicial do corpo de prova, em cm^2 .

Em seguida realizou-se a correção para a temperatura de 20 °C pela equação 9, como segue:

$$k_{20} = R_T \cdot k \quad (9)$$

Em que: K_{20} é o coeficiente de permeabilidade referido à temperatura de 20 °C, em $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$; R_T é a relação entre a viscosidade da água na temperatura de ensaio e a viscosidade da água à temperatura de 20 °C.

Os valores do parâmetro que descreve a permeabilidade do solo P_1 para solos com permeabilidade rápida, moderada a rápida, moderada, lenta a muito lenta são 1, 2, 3, 4, 5 e 6,

respectivamente (WISCHMEIER, 1971 *apud* PRUSKI, 2009). A permeabilidade foi classificada de acordo com a Tabela 7 abaixo:

Tabela 7 - Classes de permeabilidade em relação à textura e condutividade hidráulica do solo

P₁	Permeabilidade (mm.h⁻¹)	Textura
1	> 60	Areia
2	20 – 60	Argiloso arenoso, arenoso
3	5 – 20	Argiloso
4	2 – 5	Argila arenosa, franco argilosa
5	1 – 2	Argila siltosa, argila arenosa
6	< 1	Argila siltosa, argila

Fonte: Adaptado (ARS - USDA, 1994).

3.3.2.3. Estrutura do solo

O parâmetro S_1 , que descreve a estrutura do solo, corresponde às classes de estrutura propostas por Wischmeier e Smith (1978), definidas a partir da ARS - USDA (1994) para cada tipo de solo (Tabela 8). Considera-se argila partículas com diâmetros menores que 0,002 mm; silte entre 0,05 e 0,002 mm; areia muito fina entre 0,1 e 0,05 mm; areia fina entre 0,25 e 0,10 mm; areia média de 0,5 a 0,25 mm; areia grossa entre 1 e 0,5 mm; e areia muito grossa com o diâmetro de 1 a 2 mm.

Tabela 8 - Classes de estrutura do solo

S₁	Descrição
1	Granular muito fina
2	Granular fina
3	Granular grosseira
4	Compacta

Fonte: Adaptado (ARS - USDA, 1994).

3.3.2.4. Teor de matéria orgânica

Os ensaios para determinar o teor de matéria orgânica do solo foram realizados conforme a metodologia da NBR 13600 de 1996, a qual prescreve o método para determinação do teor de matéria orgânica de solos através da queima na mufla à temperatura de $440 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$ do material previamente seco em estufa à $105 \text{ }^\circ\text{C}$ (Figura 13).

Figura 13 - Mufla à $440 \text{ }^\circ\text{C}$ para determinação do teor de matéria orgânica



O teor de matéria orgânica do solo foi determinado pela Equação 10 abaixo:

$$MO(\%) = \left(1 - \frac{B}{A}\right) \cdot 100 \quad (10)$$

Em que A é o peso do solo seco à $105 \text{ }^\circ\text{C}$, e B é o peso do solo seco à $440 \text{ }^\circ\text{C}$.

Em seguida foi gerado mapa com valores de erodibilidade da bacia a partir de pontos com valores de erodibilidade conhecidos utilizando técnicas de geoprocessamento.

3.2.3. Fator topográfico – LS

O fator topográfico LS foi calculado como uma composição de dois fatores, o comprimento de rampa (L_R) e o grau de declive (S_R) de acordo com a equação 11 proposta por Bertoni e Lombardi Neto (1999).

$$LS = 0,00984 \cdot L_R^{0,63} \cdot S_R^{1,18} \quad (11)$$

Para a obtenção de S_R utilizaram-se dados SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) com resolução espacial de 92 m, disponíveis na rede mundial de computadores diretamente do endereço <http://srtm.usgs.gov/data/obtainingdata.html>. Através da utilização de técnicas de geoprocessamento obteve-se a declividade S_R (%) da área de estudo, a qual foi dividida em sete intervalos de classe, sendo estes: 0 - 2%, 2 - 4%, 4 - 8%, 8 - 16%, 16 - 32%, 32 - 64% e maior que 64%. O valor de S_R utilizado foi o resultado da média geométrica das classes selecionadas previamente.

Em seguida obteve-se a definição dos cursos de rios, que dependem do valor mínimo de área de acumulação (*Threshold*), considerando para este caso um valor de 5 de células acumuladas, ou seja, 0,42 km² de área de acumulação. Então foi realizada a verificação do comprimento de drenagem em cada intervalo de classe de S_R , como também a área que cada classe ocupa na bacia. Após conhecer o comprimento da drenagem e área em cada intervalo de classe de S_R procedeu-se ao cálculo do comprimento de rampa (L_R) através da Equação 12 proposta Fernandes *apud* Mamede (2002):

$$L_R = \frac{A}{4.L_0} \quad (12)$$

Em que, L_R é o comprimento médio de rampa, em m; L_0 é a soma dos comprimentos de drenagem em cada intervalo de classe, em m; e A é a área do intervalo de classe em questão, em m².

3.2.4. Cobertura vegetal – fator C

A determinação do fator C foi realizada usando o índice de vegetação NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*). Para isso, foram utilizadas imagens do satélite Landsat 5 TM de 19 de junho de 1991. As imagens foram adquiridas gratuitamente do site <http://www.dgi.inpe.br/CDSR>, importadas e georreferenciadas utilizando o software SRPING 5.1.7.

Para geração do NDVI foi utilizada a Equação 13, que tem como variáveis as bandas do vermelho e infravermelho próximo. Foram utilizadas as bandas 4 e 3 do satélite Landsat 5 TM, ou seja, a banda da região do infravermelho próximo e do vermelho, respectivamente:

$$\text{NDVI PROCESSADO} = \text{Ganho} \cdot \left(\frac{\text{IVP} - \text{V}}{\text{IVP} + \text{V}} \right) + \text{Offset} \quad (13)$$

Em que, IVP é o valor da refletância da banda no Infravermelho próximo; V é o valor de refletância da banda no vermelho. Os valores ganho e *offset* utilizados foram 500 e 50, respectivamente.

Após gerar o NDVI, procedeu-se uma classificação supervisionada da imagem, em que amostras foram coletadas para o treinamento do classificador, fazendo a subdivisão das classes que mostraram uma maior diversidade nos elementos analisados na classificação visual, procurando obter amostras uniformes. As classes que exigiram uma maior diversidade dos temas foram: água, caatinga densa preservada, caatinga aberta, caatinga degradada, e centro urbano. Os valores de C adotados para essas classes foram os mesmos adotados em Creutzfeldt (2006), sendo 0 – água, 0,001 - área urbana, 0,005 - caatinga densa preservada, 0,06 - caatinga aberta, e 0,3 - caatinga degradada.

3.2.5. Práticas conservacionistas – fator P

Para o fator práticas conservacionista admitiu-se que na bacia não há práticas de controle à erosão, ou seja, o valor do fator P é igual a 1.

3.2.6. Erosão localizada

Utilizando a Equação 4 associada a técnicas de geoprocessamento, com superposição de mapas dos fatores que influenciam na erosão do solo (R, K, LS e CP), definiu-se as classes de perda média anual de solo na bacia, denominadas de unidades de erosão.

3.3. Balanço e propagação de sedimento

3.3.1. Assoreamento na bacia

A estimativa da perda de solo na bacia foi realizada através do uso da Equação Universal de Perda de Solo (EUPS) associada à razão de aporte de sedimentos (SDR). Dessa

forma, a quantidade de sedimento produzido na bacia hidrográfica do açude Pentecoste foi estimada a partir da equação 14.

$$P_S = M_L \cdot SDR \quad (14)$$

Em que: P_S = Produção de sedimento (t); M_L = Massa erodida localmente na bacia por unidade de área ($t \cdot ha^{-1}$); SDR = Fração percentual de sedimento erodido que consegue atingir a rede de drenagem.

O SDR foi calculado a partir da equação de Maner *apud* Araújo (2003), (Equação 15), que considera fundamentalmente o efeito da declividade do terreno no transporte difuso e é dada por:

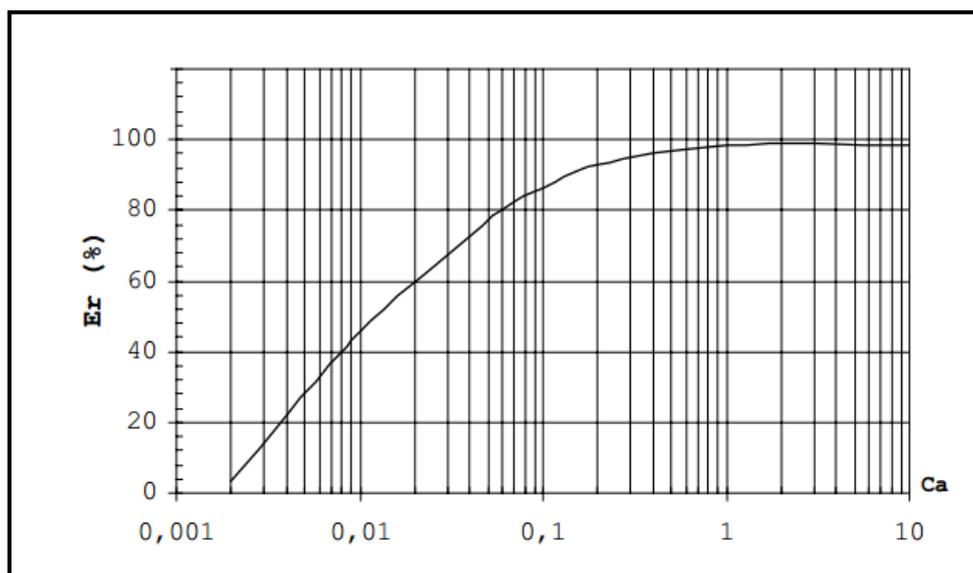
$$\text{Log}(SDR\%) = 2,943 - 0,824 \cdot \text{Log}(L_m/F_r) \quad (15)$$

Sendo: L_m o comprimento máximo da bacia, em linha reta, medido paralelamente ao rio principal em metros; F_r a diferença entre a cota média do divisor de água e a cota do exutório em metros.

3.3.2. Eficiência de retenção dos reservatórios

O cálculo da eficiência de retenção do sedimento afluyente aos reservatórios (E_r) foi feito através da curva de Brune (1953 *apud* Morris e Fan, 1997), apresentada na Figura 14. Esta equação foi determinada empiricamente através da análise do comportamento de reservatórios americanos. De acordo com a curva de Brune, a eficiência de retenção depende da capacidade de afluência (C_a) do sistema, que é a relação entre a capacidade do reservatório e o volume anual afluyente ao mesmo.

Figura 14 - Curva média de retenção de sedimentos através do método de Brune



Fonte: adaptado de Bicalho (2006)

3.3.3. Massa específica aparente do sedimento

Araújo (2003) recomenda que, para calcular a massa de sedimento efetivamente depositada em um reservatório, deve-se proceder a uma sondagem para avaliar a massa específica aparente do solo assoreado, coletando diversas amostras de sedimento assoreado em cada um dos reservatórios para análise em laboratório e posteriormente determinar a massa específica aparente média.

Para o presente estudo utilizou-se o valor médio de massa específica aparente de $1,3 \text{ g.cm}^{-3}$, valor esse encontrado por Araújo (2003) como média para bacias hidrográficas do Semiárido Brasileiro.

3.3.4. Propagação de sedimentos

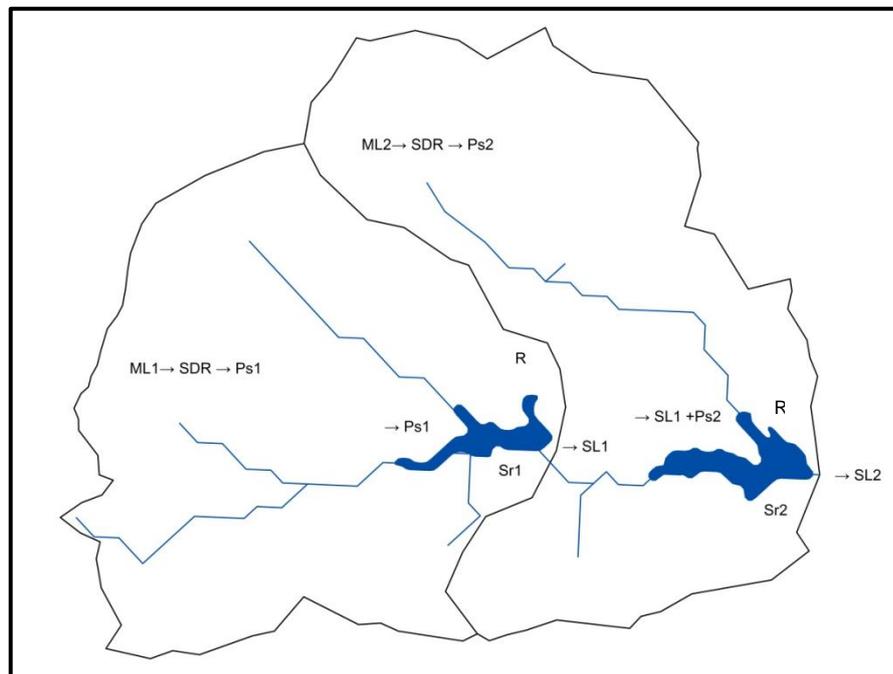
A propagação de sedimentos na bacia foi realizada através de modelagem simplificada desenvolvida pelo Grupo de Estudos Hidrossedimentológicos do Semiárido (Hidrosed).

A estrutura espacial do modelo unidimensional é composta por sub-bacias, com subdivisões em unidades espaciais de erosão derivadas da superposição de mapas, conforme explicado anteriormente. A estimativa da erosão, produção de sedimentos e assoreamento é realizada seguindo a ordem natural de propagação do escoamento e, conseqüentemente, do

transporte de sedimentos na bacia, ou seja, de montante para jusante, no passo de tempo mensal (Figura 15), como segue:

- Calcula-se a erosão de cada unidade espacial utilizando a EUPS, resultante da multiplicação de mapas dos parâmetros;
- Determina-se a produção de sedimentos, multiplicando-se a erosão pela razão de aporte de sedimentos SDR, estimado para toda a bacia;
- Soma-se à produção de sedimento, a contribuição proveniente da descarga sólida efluente de sub-bacias localizadas a montante;
- Estima-se a retenção de sedimentos usando o coeficiente de Brune e, conseqüentemente, a descarga sólida efluente que escoo diretamente para a próxima sub-bacia a jusante no mesmo passo de tempo;
- Calcula-se o assoreamento em unidades de volume, a partir da massa específica aparente seca;

Figura 15 - Demonstrativo do balanço de sedimentos utilizando modelagem desenvolvida pelo grupo Hidrosed



Para execução do modelo são requeridos os seguintes arquivos de entrada:

- Ordem e conexão entre os reservatórios. A conexão foi extraída através dos dados da rede de drenagem com a localização do exutório de cada reservatório da bacia;

- b) A erosividade mensal média de cada sub-bacia para os 54 anos de simulação;
- c) Informações inerentes a cada reservatório, como área, capacidade de armazenamento, classe do reservatório, coeficiente de retenção e massa específica do sedimento;
- d) Unidades de erosão e seus respectivos valores;
- e) Fração de área de cada unidade de erosão nas sub-bacias.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Levantamento da açudagem

Os dez açudes amostrados (Figura 16) obtiveram volumes variando de 1157 m³ a 362268 m³ através do método da equação do tronco de cone, e volumes variando de 879 m³ a 495447 m³ obtidos a partir da equação de Molle, como mostra a Tabela 9.

Figura 16 - Localização dos açudes levantados na bacia Pentecoste.

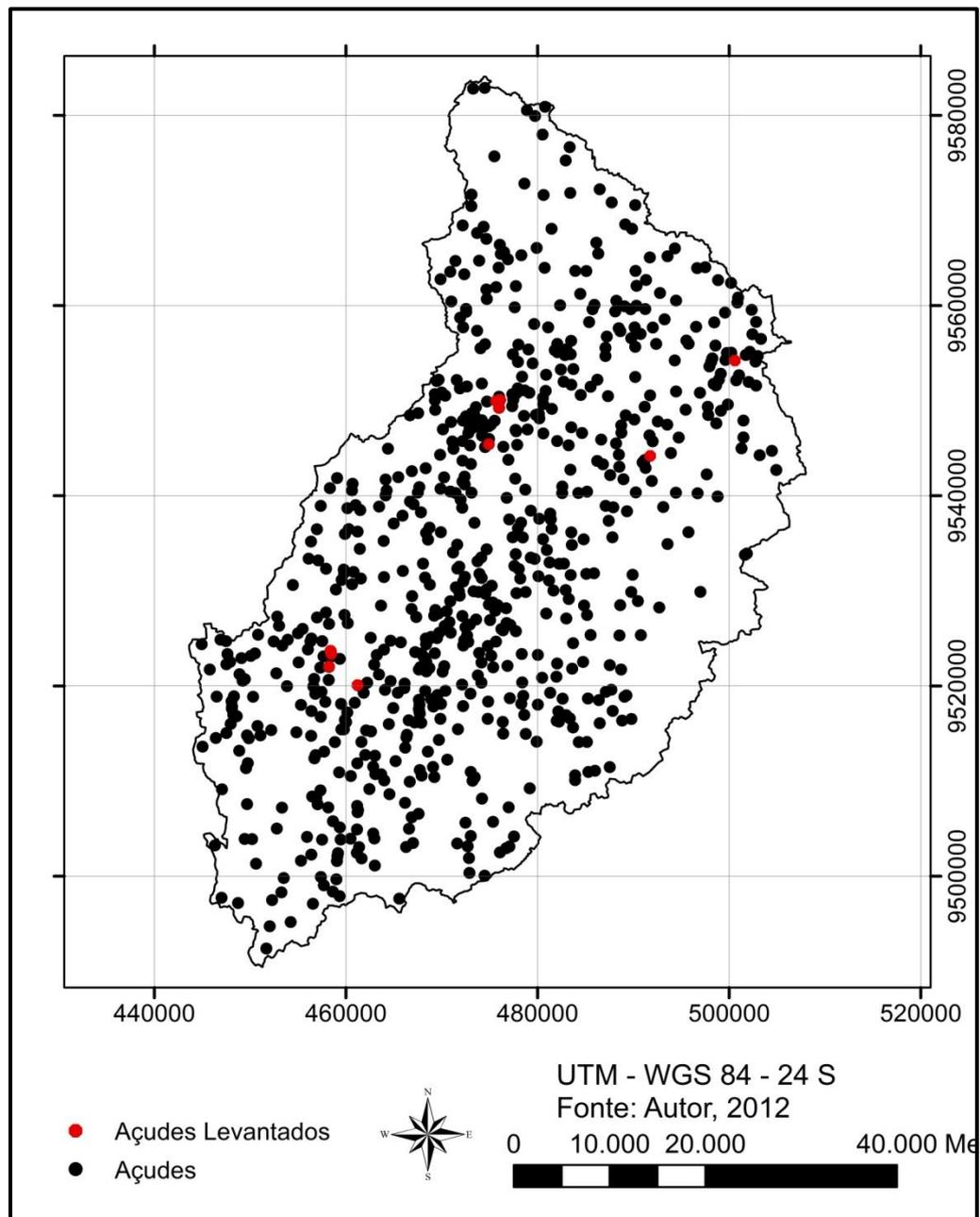
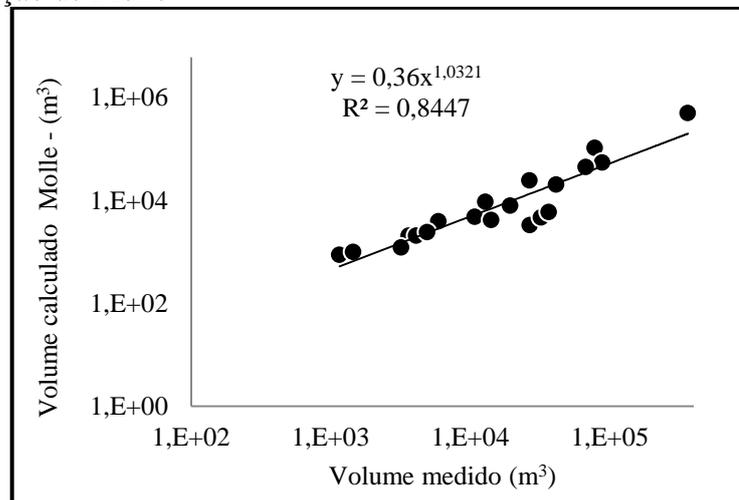


Tabela 9 – Volumes dos reservatórios levantados obtidos através do método da equação do tronco de cone e da equação de Molle.

Reservatório levantado	Volume do dia - Método do tronco de cone do dia(m ³)	Volume máximo- Método do tronco de cone (m ³)	Volume do dia - Método Molle(m ³)	Volume máximo - Método Molle(m ³)
1	3192.43	14133.82	1215.19	4122.49
2	3640.28	26745.72	2072.32	3280.48
3	4921.95	32107.90	2416.91	4614.18
4	26581.22	88077.27	24408.28	54011.59
5	12867.75	67235.73	9407.21	44297.47
6	1157.11	36622.78	878.99	5884.52
7	5912.00	19365.38	3898.72	7882.55
8	78204.00	362268.24	104657.58	495447.25
9	4110.83	41379.76	2051.79	20207.78
10	1452.27	10768.37	987.13	4751.92

A comparação dos volumes obtidos através da equação do tronco de cone e da equação de Molle, conforme apresentado na Figura 17, apresentou um coeficiente de determinação $R^2 = 0.84$, com coeficiente de Nash-Sutcliffe de 0,81 (NASH; SUTCLIFFE, 1970).

Figura 17 - Gráfico comparativo entre os volumes a partir dos métodos da equação do tronco de cone e da equação de Molle



O levantamento da açudagem na bacia de Pentecoste resultou em 623 e 733 reservatórios para os anos de 1985 e 2004, respectivamente, mostrando assim uma evolução temporal de 18% para o período avaliado. Malveira (2009), estudando uma bacia também no semiárido, encontrou um crescimento de 46% no período de 1970 a 2002. Assim, o crescimento anual médio na bacia Pentecoste é de aproximadamente $1\%.\text{ano}^{-1}$, já o

encontrado por Malveira (2009) foi de $1,4\%.\text{ano}^{-1}$, para uma área sete vezes superior à da bacia aqui estudada.

Após constatar que a equação de Molle (1989) aplica-se muito bem à região estudada, procedeu-se ao cálculo do volume armazenado na bacia para as diferentes épocas do estudo, e se fez a divisão dos reservatórios levantados em cinco classes distintas, de acordo com o volume dos mesmos, como mostra a Tabela 10.

O número de classes aqui adotado foi adaptado do Decreto nº 23.068, de 11 de fevereiro de 1994, publicado no Diário Oficial do Estado – DOE de 18 de fevereiro de 1994, que regulamenta o controle técnico das obras de oferta hídrica e dá outras providências (CEARÁ, 1994). Essa adaptação procedeu-se devido os volumes encontrados nos açudes preencherem apenas quatro classes da classificação original.

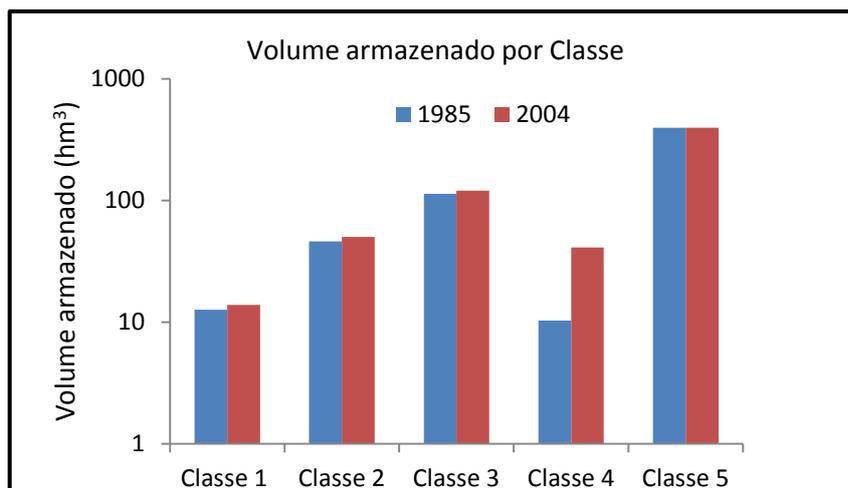
Nota-se um aumento do número de reservatórios para as classes 1, 2, 3 e 4, sendo esse aumento de 19, 12, 16, 100%, respectivamente, não sendo observada evolução dentro da classe 5. A grande dificuldade de levantamentos de uso e ocupação do solo por imagem de satélite e, principalmente de análise de reservatórios, é a falta de imagens com qualidade no fim do período chuvoso. Esse seria o período em que os reservatórios se encontrariam com maior volume armazenado, podendo assim estimar com maior precisão os volumes máximos dos mesmos.

Tabela 10 - Classes de reservatórios da bacia hidrográfica do açude Pentecoste, com base na capacidade de armazenamento hídrico para os anos de 1985 e 2004.

Ano	Classes	Intervalos (m ³)	Número de reservatórios	Frequência (%)
1985	1	< 100.000	444	71,27%
	2	100.000 – 1.000.000	145	23,27%
	3	1.000.000 – 10.000.000	32	5,14%
	4	10.000.000 – 100.000.000	1	0,16%
	5	> 100.000.000	1	0,16%
Resumo 1985			623	100%
2004	1	< 100.000	530	72,31%
	2	100.000 - 1.000.000	163	22,24%
	3	1.000.000 - 10.000.000	37	5,05%
	4	10.000.000 - 100.000.000	2	0,27%
	5	> 100.000.000	1	0,14%
Resumo 2004			733	100%

Fica evidenciando na Tabela 10 uma maior incidência de micro reservatórios (classe 1) em ambos os anos analisados, tendo uma frequência de 71% e 72% para os anos de 1985 e 2004, respectivamente. Apesar de o número de açudes de classe 1 ter aumentado de 444 para 530, as classes 2 e 3 também sofreram um aumento, mantendo-se praticamente a mesma frequência e o mesmo percentual de volume armazenado na bacia (Figura 18).

Figura 18 - Volume armazenado por classes dos reservatórios



A classe 4 obteve um aumento de 100%, isso se deve à construção de mais um reservatório de grande porte, o Sousa, concluído em 1998, provocando uma mudança na frequência de 0,16 para 0,27% e um aumento no volume armazenado de 1,8 para 6,6% da classe 4 dentro da bacia. Já a classe 5 não sofreu alteração no número de açudes, com uma redução de 0,02%, em virtude do crescimento das demais classes.

Analisando-se o volume armazenado na bacia por classes, observamos um aumento nas classes 1, 2, 3 e 4 de 9,58, 8,67, 5,98 e 298,26%, respectivamente. O aumento na classe 4 significa um incremento no volume armazenado de 30,84 hm³. Já a classe 5 manteve-se estável, como mencionado anteriormente. Acredita-se que esta estabilidade na classe 5, se deve ao alto custo de construção, além do grande impacto ambiental gerado por reservatórios desse porte, além disso, existe uma quantidade limitada de grandes boqueirões para a construção desses açudes. Já o incremento no volume total armazenado na bacia foi de 7,4% no período avaliado.

Na Tabela 11 são apresentadas, ainda, as estimativas de volume dos reservatórios a partir das áreas levantadas de imagens de satélite nos anos de 1985 e 2004. Para estimativa da capacidade de armazenamento, calcularam-se os volumes derivados das áreas máximas resultante da comparação do espelho d'água nos dois anos.

Tabela 11 - Volume armazenado por classe utilizando a área do ano em questão e a área máxima entre os anos analisados

Ano	Classes	Número de reservatórios	Vol _{ano} (hm ³)	Vol _{máx} (hm ³)	Diferença
1985	1	444	12,25	12,66	3,18%
	2	145	44,36	46,27	4,10%
	3	32	112,34	113,57	1,08%
	4	1	10,34	10,34	0,00%
	5	1	395,63	395,64	0,00%
		623	574,94	578,47	0,61%
2004	1	530	6,72	13,86	51,51%
	2	163	28,28	50,27	43,74%
	3	37	90,11	120,36	25,14%
	4	2	41,18	41,18	0,00%
	5	1	395,63	395,63	0,00%
		733	561,93	621,33	9,56%

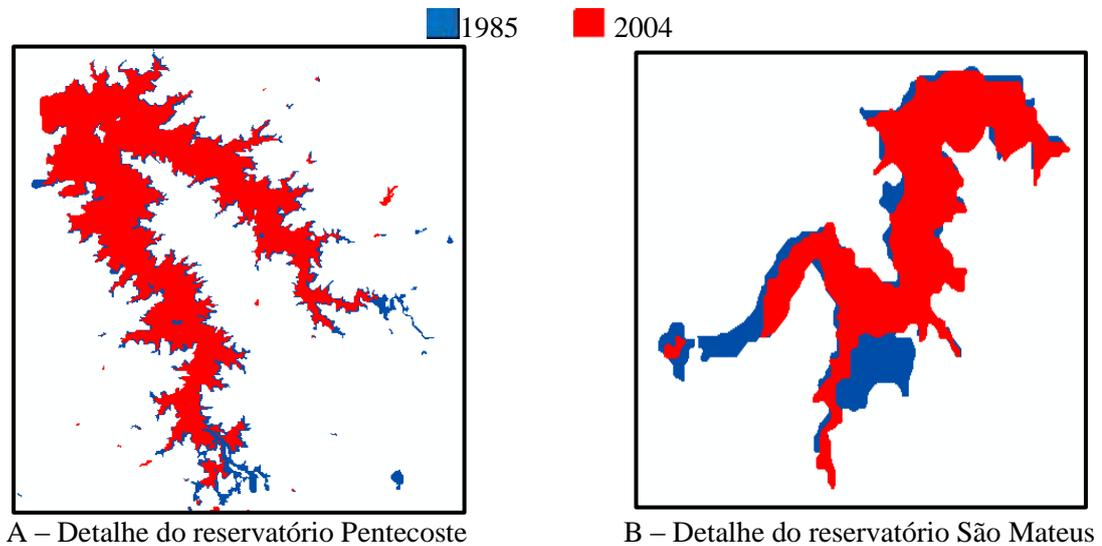
Vol_{ano} – Volume calculado a partir da área do ano em questão. Vol_{máx} – Volume calculado a partir da área máxima obtida entre as duas imagens.

No ano de 1985, no qual a precipitação no posto Pentecoste foi de 1534,6 mm, proporcionando grandes cheias na bacia, a área do espelho d'água gerou um volume armazenado na bacia de 574,94 hm³ (Tabela 10).

Em 2004, o ano foi hidrológicamente úmido, mas não suficiente para provocar grandes cheias, tendo uma precipitação de 932,9 mm, e a área dos açudes proporcionou um volume total na bacia de 561,93 hm³. Comparando com 1985, o ano de 2004 apresentou uma redução no volume armazenado total de 2%, apesar do número de açudes nas classes 1, 2, 3 e principalmente na classe 4 (que possui grande capacidade de armazenamento) terem aumentado. Observou-se assim uma diferença na área do espelho d'água levantado em 2004, devido ao fato de a maioria dos açudes não ter chegado à sua área máxima, possivelmente proporcionando uma classificação dos reservatórios de forma incorreta (Figura 19).

A diferença no volume armazenado total da bacia (quando se compararam os volumes obtidos das áreas dos espelhos d'água dos anos de 1985 e 2004) reforça a necessidade de realizar o levantamento em anos úmidos, ou seja, em anos com alta precipitação que proporcionam sangria nos açudes garantindo assim o estado de área máxima e, consecutivamente, o volume máximo dos açudes. Para solucionar esse problema, adotou-se a maior área dos açudes entre os anos estudados como sendo a área máxima.

Figura 19 - Diferença entre as áreas dos espelhos de dois açudes da bacia do rio Curu dos anos de 1985 e 2004



Utilizando-se a área máxima encontrada entre os anos de 1985 e 2004, o volume máximo armazenado ($Vol_{m\acute{a}x}$) da bacia foi de $578,47 \text{ hm}^3$, tendo assim um acréscimo de 0,6%. A classe 2 foi a classe que obteve maior erro entre o volume estimado através da área do espelho d'água do ano de 1985 e o volume estimado através da área máxima.

Para o ano de 2004 observa-se que, ao utilizar a área obtida através do espelho d'água do referido ano, tem-se uma redução no volume armazenado nas classes 1, 2 e 3, sendo essa redução de 7, 22 e 30 hm^3 , respectivamente. O maior erro observado foi dentro da classe 1. Já os reservatórios de classes 4 e 5 não apresentaram erro devido sua capacidade de armazenamento ser conhecida pela agência que os monitora, e essa capacidade foi a utilizada neste trabalho.

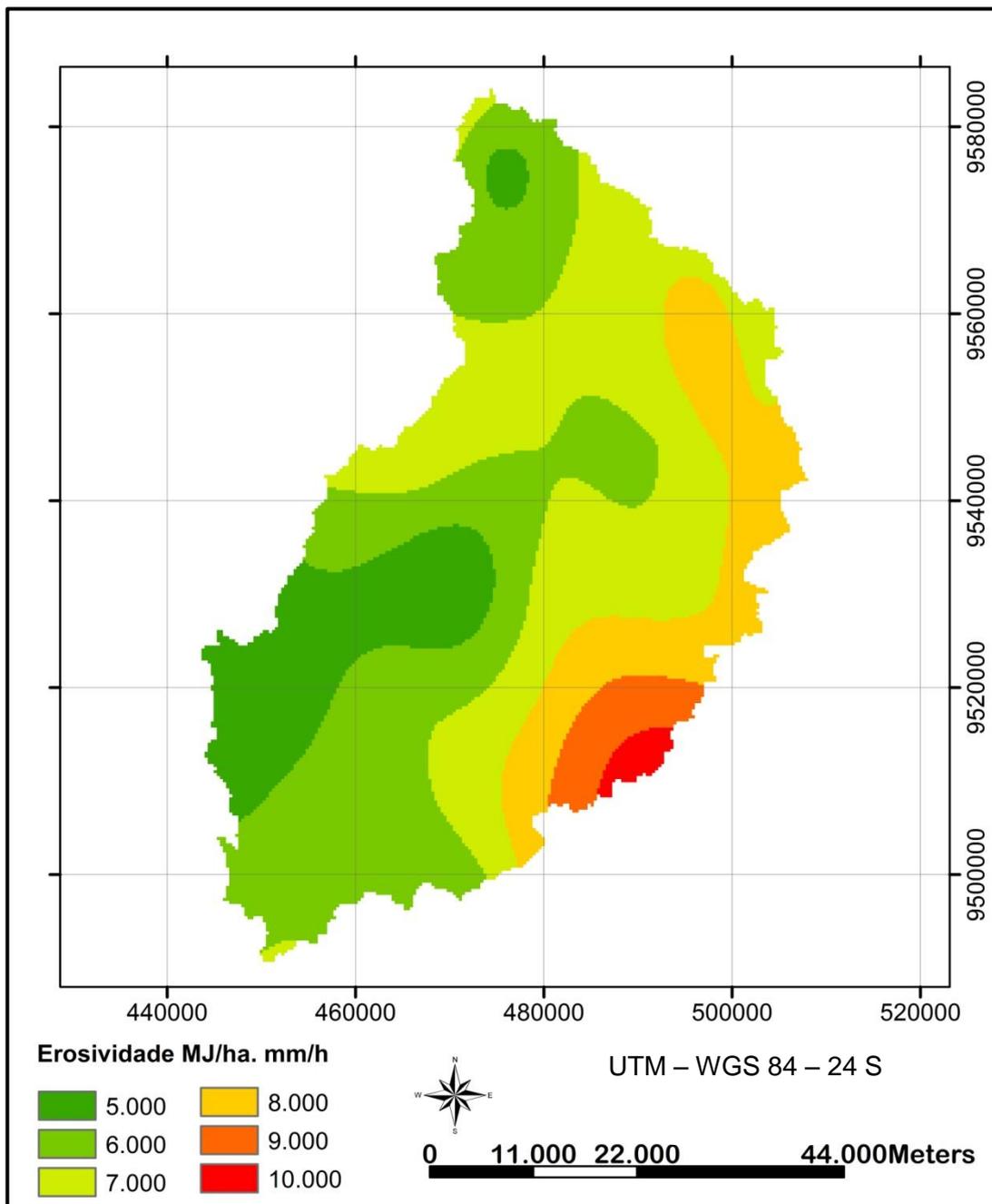
Após correção do erro nos volumes armazenados, o período avaliado (1985 – 2004) obteve um aumento do volume armazenado de 7,41%, isso se deve ao incremento no volume armazenado nas classes 1, 2, 3 e 4. Esse aumento foi maior dentro da classe 4, com 298% de acréscimo nesta classe.

4.2. Erosividade da chuva – fator R

Dos 33 postos pluviométricos situados na área de estudo e em seu entorno, foi encontrada precipitação média de $853,54 \text{ mm ano}^{-1}$, com valores variando de 611,54 a $1519,74 \text{ mm.ano}^{-1}$, e desvio padrão de $257,53 \text{ mm.ano}^{-1}$. Na área de estudo foram observados

valores de erosividade anual variando de 4240 a 10245 MJ.ha⁻¹.mm.h⁻¹, e valor médio de 7093 MJ.ha⁻¹.mm.h⁻¹, com desvio padrão de 1345 MJ.ha⁻¹.mm.h⁻¹. Esta média está próxima ao valor médio encontrado por Araújo (2003) para sete reservatórios do Estado do Ceará, de 7734 MJ.ha⁻¹.mm.h⁻¹, conforme apresentado anteriormente na Tabela 1. Na Figura 20 observa-se a erosividade da chuva especializada na bacia hidrográfica do açude Pentecoste.

Figura 20 - Erosividade espacializada na bacia hidrográfica do açude Pentecoste



As faixas de erosividade mais representativas na área foram as de 6000 e 7000 MJ.ha⁻¹.mm.h⁻¹, estas apresentaram um percentual de 34,35% e 33,36% da área total, respectivamente. As faixas de 5000 e 8.000 MJ.ha⁻¹.mm.h⁻¹ apresentaram percentuais de 13,97%, 13,94%, respectivamente; a faixa de 9.000 MJ.ha⁻¹.mm.h⁻¹ representa apenas 3,41%; da área da bacia, e a faixa de 10.000 MJ.ha⁻¹.mm.h⁻¹ apenas uma porção de 0,97% da área de estudo, correspondendo à cabeceira da bacia (Maciço de Baturité).

4.3. Erodibilidade do solo – fator K

Na Tabela 12 são apresentados os teores de matéria orgânica, a granulometria e a permeabilidade das amostras de solos coletadas na bacia do açude Pentecoste, até a profundidade de 20 cm. Os ensaios de laboratório para avaliação da erodibilidade na forma indireta englobam os ensaios de granulometria, permeabilidade, estrutura e teor de matéria orgânica do solo.

Tabela 12 - Teor de matéria orgânica, granulometria e permeabilidade das amostras dos solos coletadas na bacia hidrográfica do açude Pentecoste

Ponto	Ped. (%)	AG (%)	AM (%)	AF (%)	Silte (%)	argila (%)	k (mm h ⁻¹)	MO (%)
1	17	5	23	36	18	0,72	18,57	1,64
2	5	3	16	55	19	0,88	2,16	1,10
3	0	3	15	18	42	21,30	33,07	2,73
4	11	9	22	30	24	3,40	19,19	2,96
5	7	9	32	38	14	0,80	624,86	1,90
6	3	6	27	28	33	2,30	151,62	3,62
7	52	6	16	13	13	0,41	19,87	7,15
8	12	10	29	33	15	0,75	31,93	1,96
9	1	4	42	31	21	0,91	24,87	2,14
10	1	5	23	38	25	7,19	28,84	2,97
11	4	6	30	38	21	0,86	15,23	1,45
12	9	7	25	28	27	3,62	5,89	4,01
13	32	10	20	19	16	2,35	7,66	4,46
14	4	6	27	31	29	2,28	13,01	4,82
15	10	9	33	27	21	0,76	23,62	1,54
16	4	2	25	40	28	0,88	18,32	1,62
17	1	3	36	45	15	0,91	59,92	1,09
18	15	6	24	30	23	2,07	16,10	9,45
19	1	5	27	41	26	0,89	11,30	6,72
20	4	3	23	40	26	2,36	21,84	2,66
21	3	5	27	34	28	2,35	56,36	4,45

22	5	5	18	25	40	6,78	32,25	2,48
23	1	3	45	35	15	0,90	2,02	0,68
24	0	4	38	32	25	0,90	12,74	1,83
25	36	12	15	27	9	0,48	62,17	1,44
26	3	2	24	40	29	0,89	5,70	1,11
27	6	6	27	31	26	3,70	9,31	2,72
28	13	8	20	27	28	4,54	4,04	1,72
29	4	3	21	44	27	0,88	6,33	0,54
30	7	5	18	33	32	5,06	18,42	1,82
31	4	5	30	34	26	0,86	4,26	0,43
32	0	1	29	43	24	2,55	2,41	5,99
33	1	3	28	32	35	0,91	6,66	10,86
34	0	1	5	36	48	10,88	5,92	5,84
35	2	4	28	40	24	2,42	10,90	0,08
36	0	1	11	59	27	2,56	11,73	2,94
37	1	4	36	40	18	0,89	32,29	1,14

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); k: Permeabilidade do solo saturado; MO: Matéria orgânica.

Os ensaios granulométricos foram executados com uso de defloculante. O uso do agente dispersor (defloculante) dentro da execução do ensaio permitiu desagregar de forma mais eficiente as partículas finas que não foram desagregadas através do destorroamento. Estes ensaios foram realizados em três etapas, de acordo com a NBR 7181/84: peneiramento grosso, peneiramento fino e sedimentação.

Os pontos amostrados, à exceção 7, 9, 13, 15, 24 e 35, apresentaram predominância de areia fina (65%) e silte (16%), variando de 28 a 59% e 28 a 48% para areia fina e silte, respectivamente. Dessa forma, 81% dos pontos analisados possuem predominância das frações areia fina e silte, e de acordo com Wischmeier, Johnson e Cross, (1971), a erodibilidade tende a aumentar com o incremento do conteúdo de silte mais areia muito fina.

A permeabilidade do solo (k) foi obtida no Laboratório de Mecânica dos Solos e Pavimentação da UFC *Campus* do Pici, utilizando-se permeômetro de carga variável (Figura 12). Os procedimentos experimentais foram realizados seguindo a NBR-14545/2000 da ABNT. A permeabilidade nos pontos 5, 6 e 25 foi classificada como elevada, enquanto que nos pontos 3, 8, 9, 10, 15, 17, 20, 21, 22, e 37 foram classificados como moderada a rápida. Já a permeabilidade nos pontos 1, 4, 7, 11 a 14, 16, 18, 19, 24, 26, 27, 29, 30, 33 a 36 foi moderada, enquanto que nos pontos 2, 23, 28, 31 e 32 apresentaram uma permeabilidade de devagar a moderada (classificação de ARS-USDA, 1994), de acordo com a Tabela 13 abaixo.

Tabela 13 – Classificação da permeabilidade e estrutura do solo dos pontos amostrados na bacia hidrográfica do açude Pentecoste

Ponto	k (mm.h ⁻¹)	P ₁	Estrutura	S ₁
1	18.57	3	Granular muito fina	1
2	2.16	4	Compacta	4
3	33.07	2	Compacta	4
4	19.19	3	Granular grosseira	3
5	624.86	1	Compacta	4
6	151.62	1	Granular fina	2
7	19.87	3	Granular grosseira	3
8	31.93	2	Granular grosseira	3
9	24.87	2	Granular grosseira	3
10	28.84	2	Granular grosseira	3
11	15.23	3	Granular grosseira	3
12	5.89	3	Granular grosseira	3
13	7.66	3	Granular grosseira	3
14	13.01	3	Granular grosseira	3
15	23.62	2	Compacta	4
16	18.32	3	Granular grosseira	3
17	59.92	2	Granular fina	2
18	16.10	3	Granular fina	2
19	11.30	3	Granular muito fina	1
20	21.84	2	Granular grosseira	3
21	56.36	2	Granular fina	2
22	32.25	2	Granular fina	2
23	2.02	4	Granular muito fina	1
24	12.74	3	Granular muito fina	1
25	62.17	1	Granular fina	2
26	5.70	3	Granular fina	2
27	9.31	3	Granular fina	2
28	4.04	4	Granular fina	2
29	6.33	3	Granular fina	2
30	18.42	3	Granular muito fina	1
31	4.26	4	Granular fina	2
32	2.41	4	Granular muito fina	1
33	6.66	3	Granular fina	2
34	5.92	3	Granular grosseira	3
35	10.90	3	Granular fina	2
36	11.73	3	Granular fina	2
37	32.29	2	Granular fina	2

k: Permeabilidade do solo saturado; P₁: Parâmetro que descreve a permeabilidade do solo; S₁: Parâmetro que descreve a estrutura do solo

Com relação ao teor de matéria orgânica, a bacia hidrográfica apresentou valores variando de 0,08 a 10,86%. Os pontos com teores mais elevados (7, 13, 14, 18, 19, 21, 32 a

34) estão localizados nas áreas de cabeceira da bacia, locais esses em que a vegetação é mais densa, existindo também resquícios de mata atlântica nas proximidades dos municípios de Guaramiranga e Aratuba.

As classes de estrutura dos solos foram determinadas como propostas na Tabela 8. Os pontos 1, 19, 23, 24, 30 e 32 pertencem à classe 1; classe 2 os pontos 6, 17, 18, 21, 22, 25 e a 29, 31, 33, 35, 36 e 37 à classe 2; os pontos 4, 7 a 14, 16, 20 e 34 à classe 3 e os pontos 2, 3, 5 e 15 à classe 4.

A permeabilidade do solo foi classificada de acordo com a Tabela 7 proposta pela ARS-USDA (1994), definiu as seguintes classes: 1 para os 5, 6, 25, 2 para 3, 8 a 10, 15, 17, 20 a 22, e 37, 3 para 1, 4, 7, 11 a 14, 16, 18, 19, 24, 26, 27, 29, 30, 33, 34, 35 e 36, e 4 para 2, 23, 28, 31 e 32, mostrado na Tabela 13. A partir destas informações e dos percentuais de silte mais areia fina, areia e matéria orgânica (Tabela 12), foram determinados os valores de erodibilidade do solo através da Equação 7.

A Tabela 14 mostra os valores calculados de erodibilidade, divididas em classes de interpretação propostas por Freire e Pessoti (1978).

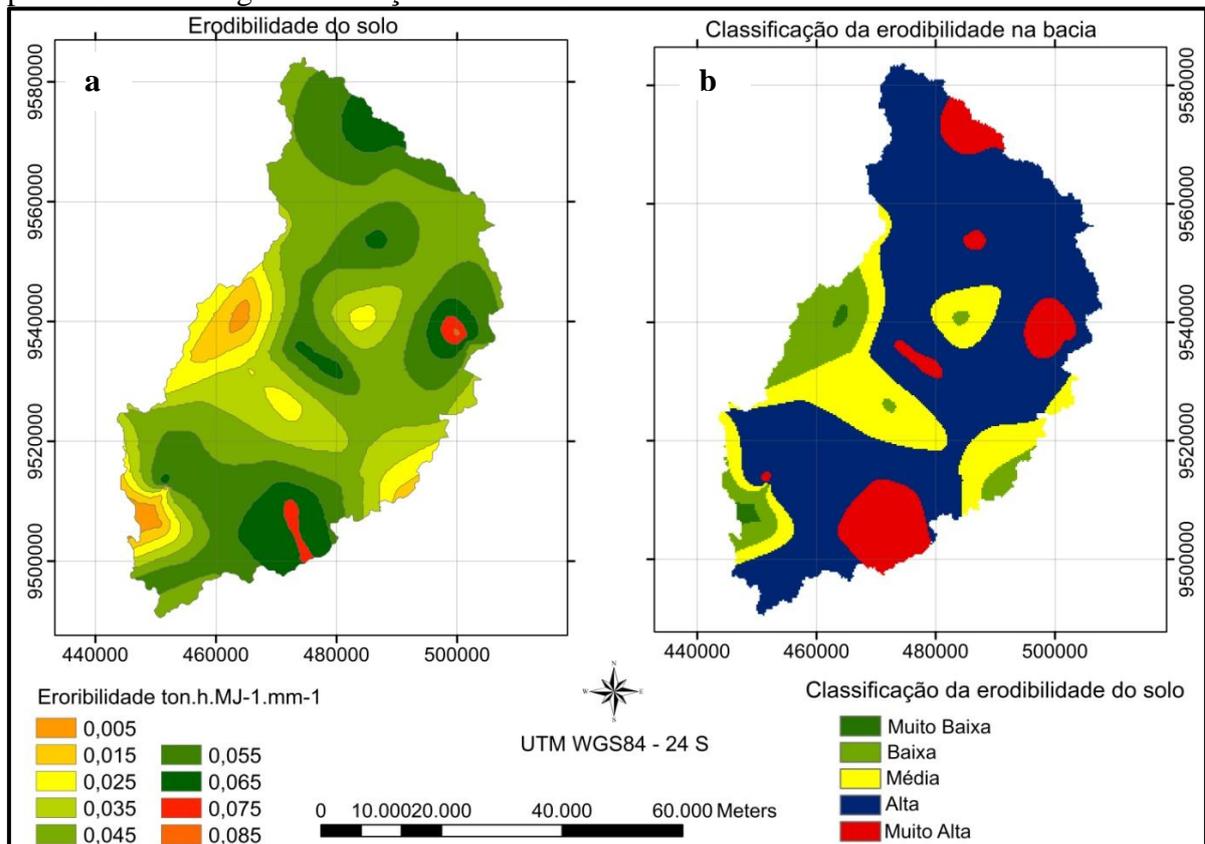
Tabela 14 - Erodibilidade e classificação nos pontos de amostragem da área em estudo

Ponto	K (ton.h.MJ ⁻¹)	Classificação da erodibilidade	Ponto	K (ton.h.MJ ⁻¹)	Classificação da erodibilidade
1	0,047	Alta	20	0,058	Alta
2	0,089	Muito alta	21	0,039	Média
3	0,046	Alta	22	0,051	Alta
4	0,048	Alta	23	0,050	Alta
5	0,050	Alta	24	0,049	Alta
6	0,040	Média	25	0,027	Baixa
7	0,015	Baixa	26	0,072	Muito alta
8	0,045	Média	27	0,047	Alta
9	0,048	Alta	28	0,052	Alta
10	0,050	Alta	29	0,077	Muito alta
11	0,061	Alta	30	0,054	Alta
12	0,043	Média	31	0,068	Muito alta
13	0,026	Baixa	32	0,036	Média
14	0,025	Baixa	33	0,007	Muito baixa
15	0,050	Alta	34	0,049	Alta
16	0,071	Muito alta	35	0,070	Muito alta
17	0,057	Alta	36	0,075	Muito alta
18	0,012	Muito baixa	37	0,055	Alta
19	0,029	Baixa			

De posse dos dados calculados de erodibilidade nos pontos amostrados, foi possível realizar a interpolação dos pontos de modo a se obter a erodibilidade em toda a bacia hidrográfica (Figura 21a). O resultado desta interpolação mostrou que 35,8% da área da bacia possui uma erodibilidade de $0,045 \text{ ton.h.MJ}^{-1}.\text{mm}^{-1}$, seguido por 0,055, 0,035, 0,065, 0,025, 0,015, 0,075, 0,005 e $0,85 \text{ ton.h.MJ}^{-1}.\text{mm}^{-1}$, com os seguintes percentuais de área 27,90, 15,15, 9,09, 6,72, 3,41, 0,87 e 0,03%. A erodibilidade média na bacia foi de $0,045 \text{ ton.h.MJ}^{-1}.\text{mm}^{-1}$, sendo esta média divergente ao valor médio encontrado por Araújo (2003) para 7 reservatórios do Estado do Ceará, de $0,026 \text{ ton.h.MJ}^{-1}.\text{mm}^{-1}$, conforme apresentado anteriormente na Tabela 1.

A classificação proposta por Freire e Pessoti (1978), apresentada na Figura 21b mostrou que 73,8% da bacia apresenta um potencial erosivo de alto a muito alta (63,7% alto e 10,1% muito alto), 17,6% apresenta um médio potencial erosivo, e as classes de baixo e muito baixo potencial erosivo representam 8,1 e 0,5% da área total da bacia.

Figura 21 – Erodibilidade do solo e sua classificação de acordo com Freire e Pessoti (1978) para a bacia hidrográfica do açude Pentecoste



4.4. Fator topográfico – LS

A Tabela 15 apresenta as informações que foram utilizadas para o cálculo do fator topográfico. Nessas informações estão contidos os valores de comprimento dos segmentos de rio (L_o), área (A), declividade (S_R), comprimento de rampa (L_R) e fator topográfico (LS)

Tabela 15 - Informações para o cálculo do fator topográfico na bacia hidrográfica do açude Pentecoste

L_o (km)	A (km ²)	Intervalos S_R (%)		S_R (%)	L_R (m)	LS
2554,03	551,62	0	2	1,41	54,00	0,18
2265,05	857,80	2	4	2,83	94,68	0,59
1458,49	1061,69	4	8	5,66	181,98	2,02
382,50	306,82	8	16	11,31	200,54	4,86
284,09	259,81	16	32	22,63	228,63	11,96
86,52	180,23	32	64	45,25	520,79	45,52
2,82	9,63	64	128	90,51	854,04	140,84

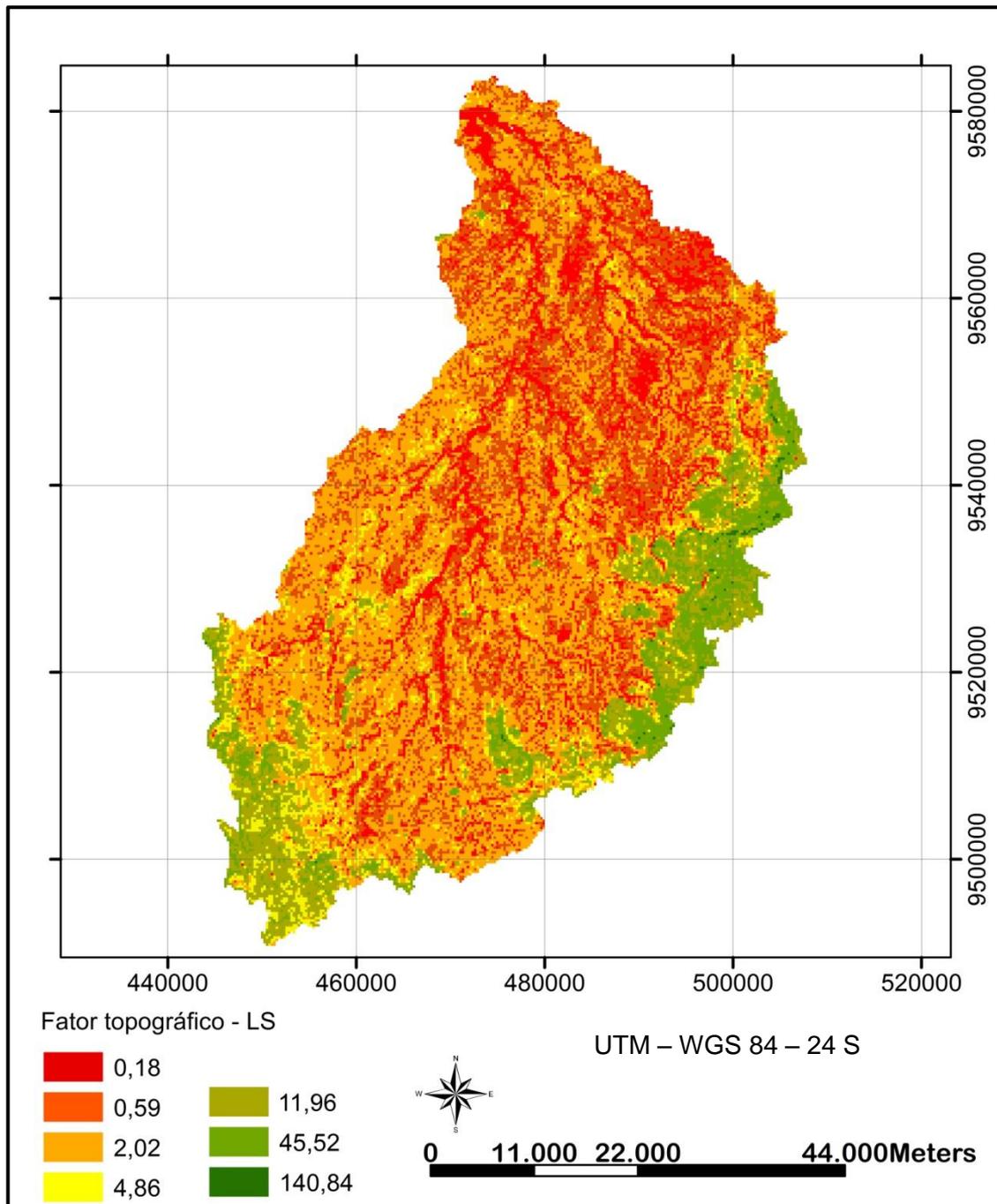
L_o : Comprimento dos segmentos de rio; A: área; S_R : declividade; L_R : comprimento de rampa e LS: fator topográfico.

Para a bacia foram encontrados valores médios de declividade variando entre 1,41 a 90,51% (1,41; 2,83; 5,66; 11,31; 22,63; 45,25 e 90,51), sendo que aproximadamente 33% foi classificada com S_R de 5,66%, a bacia apresentou uma alta declividade (90,51%) em uma pequena área, equivalente a 0,3% da bacia estudada, as demais classes representam percentuais de 27, 17, 10, 8 e 6% respectivamente para declividades de 2,84; 1,41; 11,31; 22,63 e 45,25%.

Os valores de L_R variaram de 54 a 854 m dentro das faixas de S_R , (54; 94,68; 181,98; 200,54; 228,63; 520,79 e 854), sendo que 33% da área da bacia esta contida na faixa de 181,98 m, enquanto o maior valor de L_R ocupa uma área correspondente a apenas 0,3% da bacia.

Os valores de LS calculados para a bacia hidrográfica do açude Pentecoste (Figura 22) apresentaram valores de 0,18; 0,59; 2,02; 4,86; 11,96; 45,52 e 140,84 respectivamente, com valor médio de 0,75, para as seguintes faixas de S_R 1,41; 2,83; 5,66; 11,31; 22,63; 45,25 e 90,51, os valores cálculos de LS ocupam faixas aproximadamente de 17, 27, 33, 10, 8, 6 e 0,3% de área da bacia. Já Araújo (2003), analisando sete reservatórios do Estado do Ceará, encontrou faixas de LS variando de 0,22 a 2,77, com valor médio de 1,67.

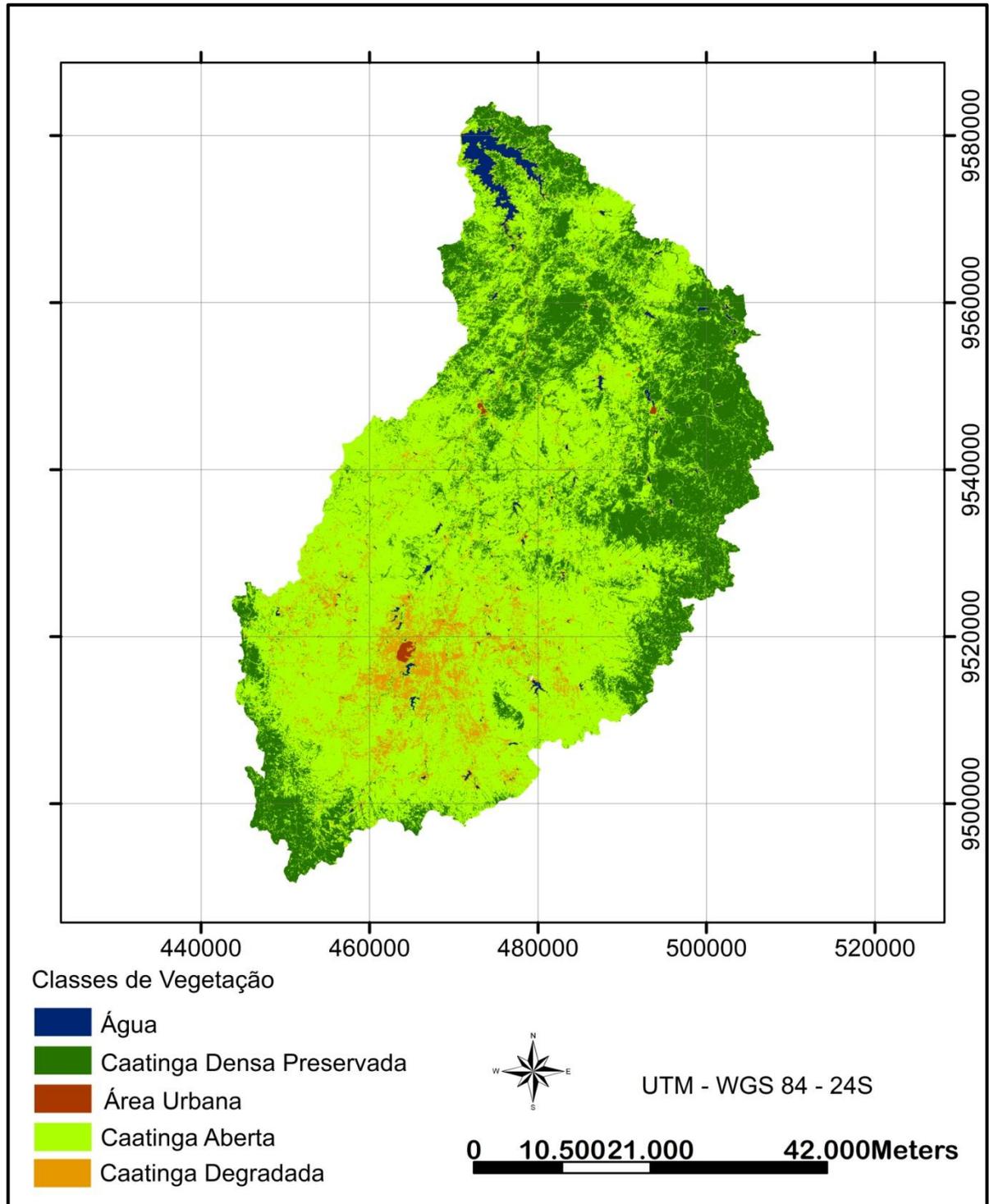
Figura 22 - Fator topográfico da bacia hidrográfica do açude Pentecoste



4.5. Fator cobertura vegetal - C

O índice NDVI gerado apresentou uma variação considerável da vegetação com os seguintes percentuais de área de cobertura: 0,15, 1,74, 6,03, 30,40 e 61,68% para as seguintes classes de vegetação: área urbana, água, caatinga degradada, caatinga densa preservada e caatinga aberta, como ilustra a Figura 23.

Figura 23 - Vegetação na bacia hidrográfica do Açude Pentecoste



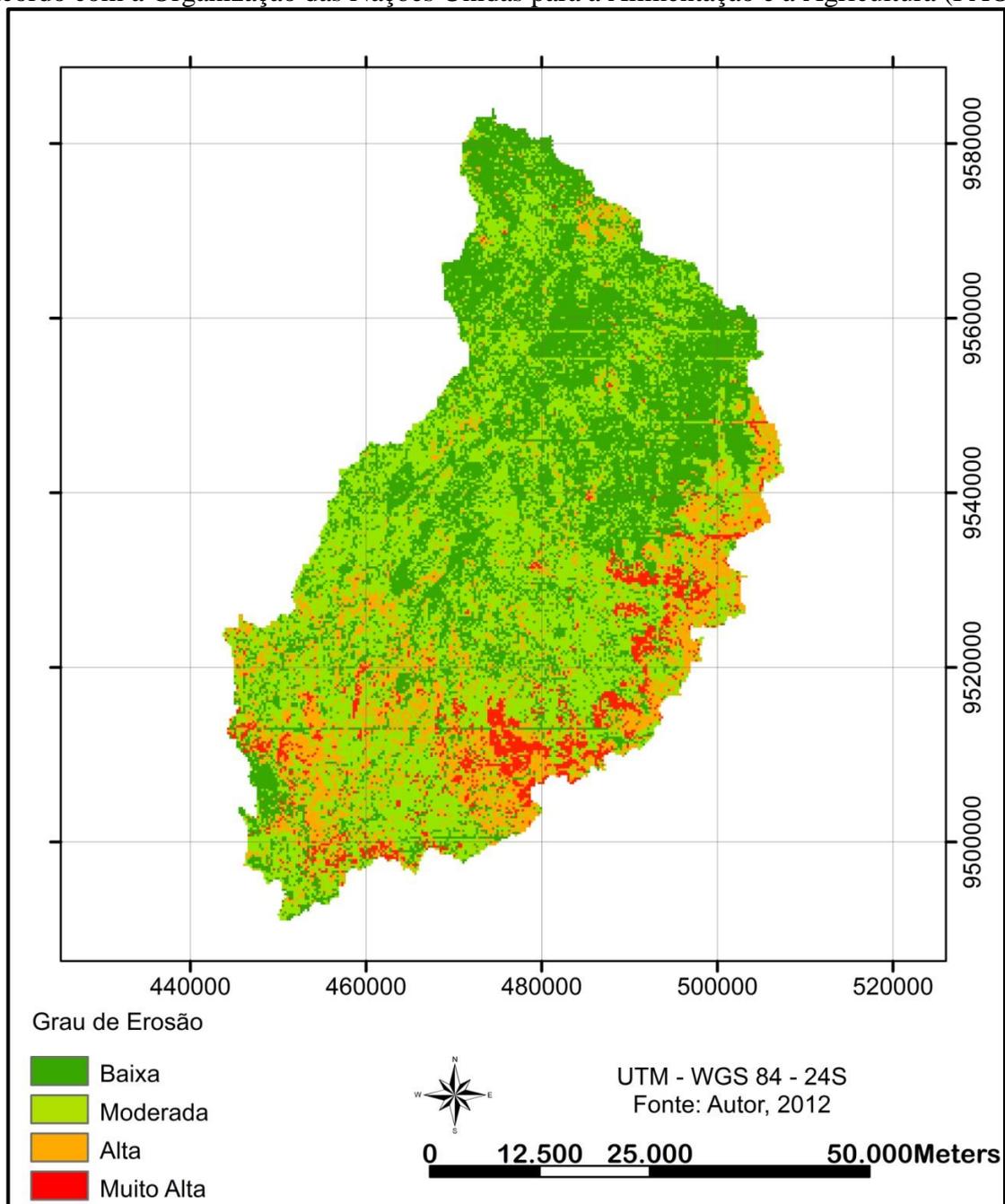
4.6. Erosão localizada

Verificou-se, a partir da matriz resultante do produto dos fatores da USLE, a ocorrência de 502 diferentes valores de erosão, com valores de 0 a 18590 $\text{ton}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{ano}^{-1}$. Com taxa de erosão média de 59 $\text{ton}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{ano}^{-1}$, o que corresponde a uma erosão total ao ano de

18,7 milhões de toneladas ao ano para toda a bacia. Os valores de erosão localizada foram classificados de acordo com o grau de erosão proposto pela FAO (1980), conforme mostrado na Figura 24.

Procedente dessa classificação observou-se que aproximadamente metade da bacia hidrográfica estudada, 42,27%, apresenta grau de erosão moderado. As demais classes de erosão apresentam frações de área de 37,58%, 14,68% e 5,47% com erosão baixa, alta e muito alta respectivamente.

Figura 24 – Classificação do grau de erosão na bacia hidrográfica do açude Pentecoste de acordo com a Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura (FAO)

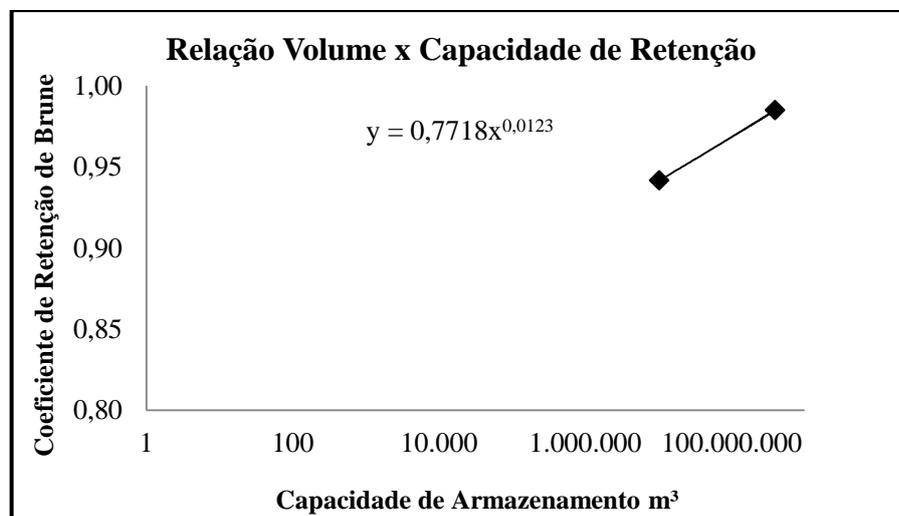


4.7. Produção de sedimentos e retenção nos reservatórios

Para estimativa da produção de sedimentos em todas as 502 unidades de erosão da bacia, utilizou-se a Equação 14. A razão de aporte de sedimentos SDR foi calculada pela Equação 15, obtendo-se um valor de 7,3%, ou seja, do total anual erodido localmente de sedimentos (18,7 milhões ton.ano⁻¹), apenas 1,36 milhões ton.ano⁻¹ atingem anualmente a rede de drenagem e chegam aos reservatórios.

Para estimativa do coeficiente de retenção de sedimentos nos reservatórios da bacia tentou-se aplicar a metodologia proposta por Brune (1953 *apud* Morris e Fan, 1997). No entanto, como apenas dois reservatórios da bacia apresentavam dados de vazão afluente média anual, os açudes Pentecoste e São Mateus, a estimativa dos coeficientes de retenção de Brune foi realizada para ambos, correspondendo a 0,98 e 0,94, respectivamente. Para estimar o coeficiente de retenção dos demais reservatórios utilizou-se uma equação de regressão gerada a partir dos dados de capacidade de armazenamento e o coeficiente de retenção de Brune para os açudes Pentecoste e São Mateus (Figura 25). De acordo com a equação obtida, os coeficientes de retenção de Brune dos demais reservatórios da bacia variaram de 0,81 a 0,98. Apesar de se utilizar apenas dois pontos para estimativa da equação, admite-se que a variabilidade dos valores encontrados na extrapolação pode representar melhor o comportamento hidrológico, sobretudo dos pequenos reservatórios, que geralmente vertem com frequência maior, do que se fosse adotado um valor constante para os reservatórios da bacia.

Figura 25 - Relação ente a capacidade de armazenamento e o coeficiente de retenção de Brune



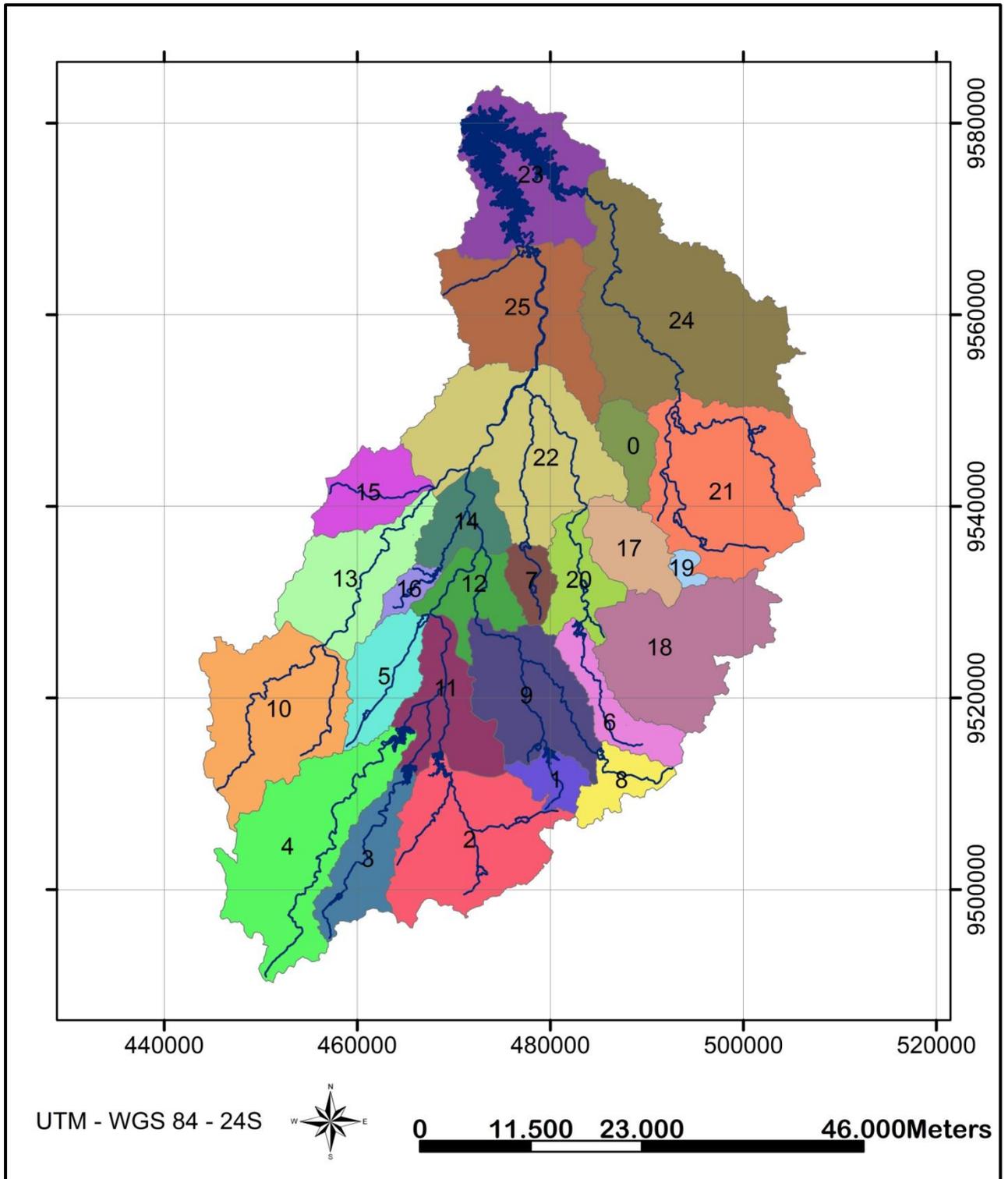
4.8. Assoreamento

4.8.1. Cenários baseados no detalhamento do sistema

Para obtenção do assoreamento nos reservatórios situados na bacia hidrográfica do reservatório Pentecoste, três diferentes cenários foram considerados, como segue:

1. O assoreamento no Pentecoste sem considerar os demais reservatórios existentes na bacia. Neste cenário, a produção de sedimentos foi estimada para toda a bacia, a partir das frações de área ocupadas pelas 502 unidades de erosão identificadas, sem retenção em reservatórios de montante;
2. O assoreamento no Pentecoste considerando os grandes reservatórios existentes na bacia. Já neste cenário, a área foi subdividida em sub-bacias traçadas com base na localização dos oito reservatórios estratégicos monitorados pela COGERH. Para obtenção de áreas com tamanhos homogêneos, outras 18 sub-bacias foram delimitadas. Nesta simulação, a produção de sedimentos foi estimada para 26 sub-bacias, delimitadas conforme apresenta a Figura 26. A propagação do sedimento através do modelo simplificado apresentado anteriormente, considera as contribuições de sedimento direta da área não-controlada e aquelas provenientes de reservatórios localizados a montante;
3. O assoreamento no Pentecoste considerando todos os reservatórios existentes na bacia. Este cenário considera todos os 733 reservatórios identificados com base nas imagens de satélite dos anos de 1985 e 2004. Da mesma forma que no cenário 2, a propagação do sedimento na bacia percorre toda a rede de conexões dos reservatórios no mesmo passo de tempo, considerando as contribuições direta de sedimento gerada e aquelas oriundas das bacias de montante.

Figura 26 – Divisão da bacia hidrográfica do Açude Pentecoste em 26 sub-bacias



A Tabela 16 apresenta os principais resultados de erosão, produção de sedimentos e assoreamento no reservatório Pentecoste, considerando os diferentes níveis de detalhamento do sistema (cenários 1 a 3), para os 54 anos de simulação (1957-2010).

Tabela 16 – Principais resultados da simulação de processos hidrossedimentológicos na bacia do açude Pentecoste para os cenários considerados (1 a 3), para os 54 anos de simulação (1957-2010)

Grandezas	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3
Erosão (ton/ano)	1.01E+09	1.04E+09	9.82E+08
Produção de sedimentos (ton/ano)	7.38E+07	4.82E+07	3.03E+07
Assoreamento do Pentecoste (ton/ano)	7.16E+07	4.75E+07	2.99E+07
Taxa de assoreamento (ton/ha/ano)	4.17	2.77	1.75
Assoreamento (m ³ /ano)	5.50E+07	3.65E+07	2.30E+07
Taxa de assoreamento (%/década)	2,58	1,70	1,08

Conforme observado na Tabela 14, embora tenham sido consideradas as mesmas unidades de erosão, observa-se uma discrepância nos valores de erosão na bacia o que pode ser explicado por imprecisões nos procedimentos de cálculo das variáveis nas escalas consideradas. Os valores de produção de sedimentos e assoreamento foram decrescendo do cenário 1 para o 3. A taxa de assoreamento no reservatório Pentecoste foi maior no primeiro cenário (2,58 %. década^{-1}) quando comparada com os cenários 2 (1,70 %. década^{-1}) e 3 (1,08 %. década^{-1}). Isso deve-se ao aumento de reservatórios a montante do reservatório estratégico, isso faz com que a taxa de assoreamento por década seja menor nos cenários 2 e 3 em virtude da retenção nos açudes de montante.

Em outubro de 2009, a Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos do Estado do Ceará (COGERH) realizou a batimetria do reservatório Pentecoste e observou um assoreamento de 32,09 milhões de m³ desde a sua construção, o que correspondente a uma taxa de assoreamento de 1,53% na década, sendo este valor muito próximo da taxa média observada para sete outros reservatórios do estado, segundo Araújo (2003), que foi de 1,83 % por década. Comparando-se os resultados da taxa de assoreamento nos três cenários com o valor medido na batimetria, pode-se observar que, embora o cenário 2 (com 26 sub-bacias) tenha se aproximado mais do valor medido, o modelo se mostrou bem mais sensível a variações nos parâmetros da USLE, sobretudo nos valores do fator C, com alta variabilidade na ordem de grandeza (0,001 a 0,3), do que na configuração do sistema (cenários 1 a 3), de acordo com alguns testes realizados.

Complementarmente, são apresentados na Tabela 17 os resultados das taxas de assoreamento nos reservatórios monitorados, considerados nas simulações com cenários 2 e 3 apenas.

Tabela 17 – Taxa de assoreamento por década nos reservatórios monitorados da bacia do Pentecoste, para os 54 anos de simulação (1957-2010)

Açude	Taxa de Assoreamento (%/década)	
	Cenário 2	Cenário 3
Trapiá I	2,11	1,46
São Mateus	9,14	7,29
Salão	6,65	4,51
Desterro	0,59	0,40
Caracas	5,04	4,27
São Domingos	0,40	0,35
Souza	4,17	2,86
Pentecoste	1,70	1,08

A taxa de assoreamento nos reservatórios monitorados variou de 0,40 a 9,14%.década⁻¹ para o cenário 2 e de 0,35 a 7,29%.década⁻¹ para o cenário 3. As taxas de assoreamento do açude São Mateus simuladas pelo modelo nos cenários 2 e 3 (correspondentes a 9,14 e 7,29%, respectivamente) foram bem superiores à encontrada por Araújo (2003), que foi de 3%.década⁻¹. Essa discrepância pode ser explicada pelo nível de detalhamento da parametrização deste modelo (3200 km²) quando comparado com o trabalho medido conduzido por Araújo (230 km²).

O resultado da simulação para o terceiro cenário (assoreamento para os 733 reservatórios da bacia estudada) nos fornece um balanço de sedimentos por classe de reservatórios, conforme detalhado na Tabela 18. A Tabela 19, por sua vez, apresenta os percentuais por classes de reservatórios (1 a 5) de algumas grandezas, tais como assoreamento nos reservatórios da classe, capacidade de armazenamento da classe, e área não-controlada das bacias contribuintes.

Tabela 18 – Principais resultados para os 54 anos de simulação (1957-2010) dos processos hidrossedimentológicos para diferentes classes de tamanho dos reservatórios (cenário 3)

Classes	Erosão (ton)	Produção de sedimentos (ton)	Descarga sólida afluyente (ton)	Assoreamento (ton)	Assoreamento (m ³)
1	1,85E+08	1,35E+07	1,42E+07	5,50E+06	4,23E+06
2	1,55E+08	1,13E+07	1,29E+07	8,32E+06	6,40E+06
3	2,05E+08	1,49E+07	1,80E+07	1,60E+07	1,23E+07
4	1,21E+08	8,86E+06	1,21E+07	1,15E+07	8,82E+06
5	3,16E+08	2,30E+07	3,04E+07	2,99E+07	2,30E+07
Total	9,82E+08	7,16E+07	8,76E+07	7,12E+07	5,47E+07

A erosão total na bacia foi de 9,82E+08 ton. Observa-se ainda que dos 71,6 milhões de toneladas de sedimentos produzidos na bacia apenas 23 milhões chegam ao

reservatório Pentecoste, o restante dos sedimentos, cerca de 48,6 milhões de toneladas, ficam retidos nos reservatórios de montante. Quando considerada a liberação de sedimentos dos reservatórios de montante, o reservatório Pentecoste passa a receber 30,4 milhões de toneladas de sedimentos.

Tabela 19 – Distribuição do sedimento por classe de reservatório

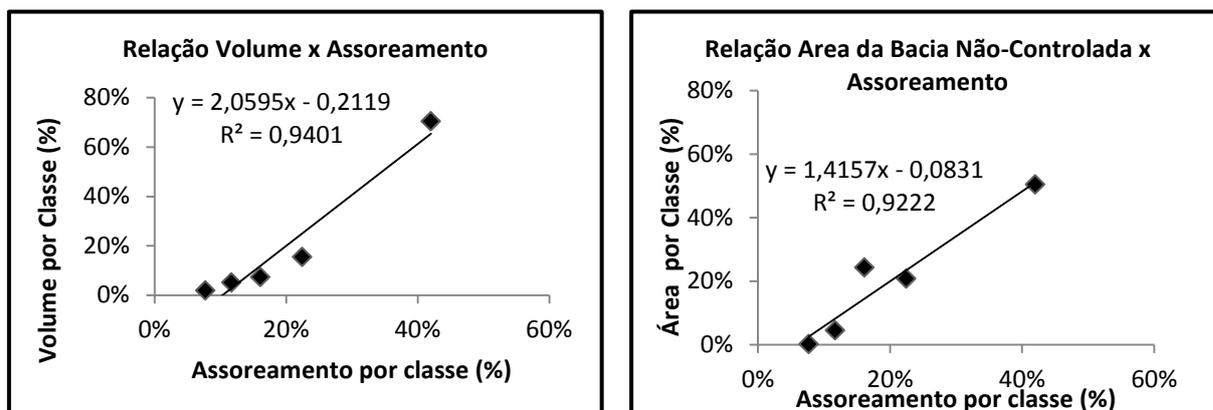
Classe	Assoreamento	Volume Armazenado	Área não-controlada
1	7,72%	1,83%	0,12%
2	11,69%	5,06%	4,49%
3	22,45%	15,37%	20,76%
4	16,11%	7,33%	24,23%
5	42,03%	70,41%	50,40%

A Tabela 19 nos mostra que os pequenos reservatórios (classe 1), com volume inferior a 100.000 m³, são responsáveis por 1,83% da capacidade de armazenamento da bacia. Apesar desses reservatórios serem ineficientes do ponto de vista hidrológico, eles foram capazes de reter 7,72% do sedimento gerado. Lima Neto *et al* (2011) encontraram percentuais de distribuição de sedimentos para bacia do Alto Jaguaribe de 5 % para os micro reservatórios que correspondem aos reservatórios de classe 1 desse estudo.

Os reservatórios classe 1, 2, 3 e 4 retiveram 7,72, 11,69, 22,45 e 16,11% do sedimento gerado na bacia, respectivamente, totalizando 58% do sedimento gerado na bacia. Em outras palavras, o reservatório estratégico recebe apenas 42% do sedimento gerado, prolongando sua vida útil.

A Figura 27 ilustra a relação entre o volume armazenado por classe dos reservatórios e o assoreamento por classe (Figura 27a), e a relação entre a área não-controlada das sub-bacias e o assoreamento por classes (Figura 27b). De acordo com as figuras apresentadas pode-se observar que há uma boa correlação entre o assoreamento dos reservatórios da classe e grandezas tais como área não-controlada e volume desses reservatórios, com coeficientes de determinação R² de 0,94 e 0,92, respectivamente. Embora tenha se observado um coeficiente de determinação maior para a relação entre assoreamento e volume dos reservatórios, o melhor ajuste se observa para a correlação entre assoreamento e área não-controlada, o que pode ser explicado pela alta eficiência dos reservatórios na retenção de sedimento, muitas vezes superior a 90%. Apenas na classe 3 da Figura 27b verifica-se uma moderada discrepância entre as grandezas correlacionadas.

Figura 27 – Relação entre o percentual do assoreamento por classe com o percentual de área das sub-bacias e área acumulada das sub-bacias



(a) Relação entre o percentual do assoreamento por classe e o percentual do volume armazenado por classe

(b) Relação entre o percentual do assoreamento por classe e o percentual de área não-controlada das sub-bacias por classe

Lima Neto *et al.*(2011) relatam que a capacidade de armazenamento inicial é um bom parâmetro para avaliar a percentagem de retenção de sedimentos em cada classe de reservatório. Sendo este um resultado prático e importante para ajudar no problema da gestão de sedimentos em bacias hidrográficas com uma densidade rede de reservatórios.

4.8.2. Cenários baseados em alteração do sistema

Com o intuito de avaliar a sensibilidade do modelo a alterações na estrutura do sistema, alguns cenários foram testados, como segue: I) com todos os reservatórios de todas as classes; II) sem os reservatórios da classe 1; III) sem os reservatórios da classe 2; IV) sem os reservatórios da classe 3; V) sem os reservatórios das classes 1 e 2; e VI) sem os reservatórios das classes 3 e 4. Os resultados de assoreamento do reservatório Pentecoste, considerando os cenários propostos (I a VI), para os 54 anos de simulação (1957-2010), são apresentados na Tabela 20.

Tabela 20 – Distribuição do sedimento por classe de reservatórios em diferentes cenários

Classe	Assoreamento (%)					
	I	II	III	IV	V	VI
1	7.72	-	7.84	7.73	-	7.77
2	11.69	12.27	-	11.90	-	11.96
3	22.45	23.98	24.81	-	26.59	-
4	16.11	17.31	18.23	17.41	19.47	-
5	42.03	46.44	49.12	62.75	53.94	80.28

I - com todos os reservatórios de todas as classes; II - sem os reservatórios da classe 1; III - sem os reservatórios da classe 2; IV - sem os reservatórios da classe 3; V - sem os reservatórios das classes 1 e 2; e VI - sem os reservatórios das classes 3 e 4.

Em todas as simulações observa-se que, quando o sistema é modificado pela retirada de uma ou mais classes, ocorre um aumento na distribuição de sedimentos nos reservatórios das classes mantidas, o que era de se esperar, sendo que esse aumento foi bem mais expressivo na classe 5, variando de 42 a 80%, o que pode ser explicado pelo fator do único reservatório da classe, o açude Pentecoste, está localizado no exutório da bacia e, portanto, mais sujeito a impactos decorrentes de alterações em qualquer parte da bacia.

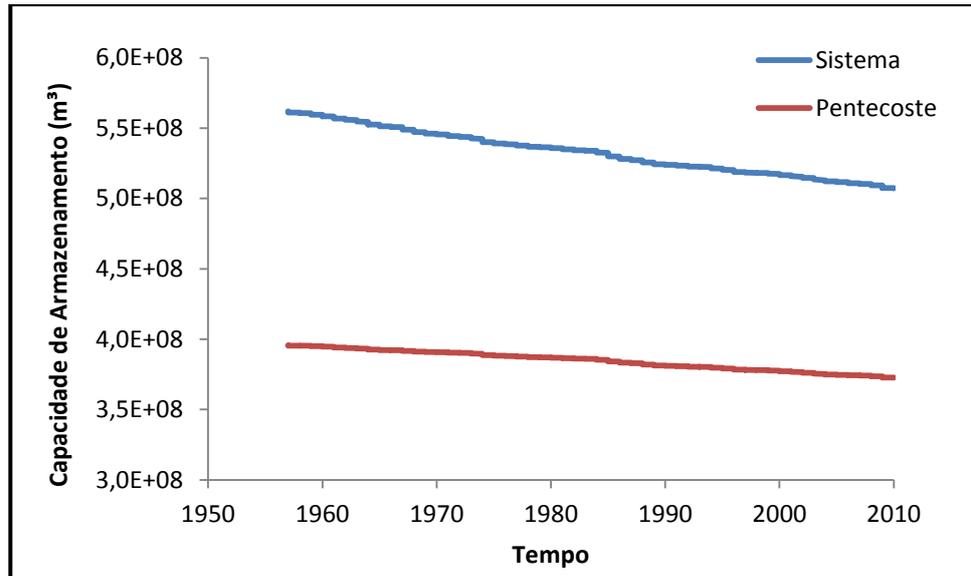
As classes 1 e 2 não mostraram variações significativas na distribuição de sedimentos em resposta à mudança de cenários, estas classes sofreram poucas alterações na mudança de cenário (I a VI), que pode ser explicado pelo fato delas estarem localizadas mais a montante do sistema, e, portanto, menos impactadas pelas retirada de reservatórios de outras classes.

A análise dos cenários propostos de alteração na estrutura do sistema possibilita a percepção da importância dos pequenos reservatórios, não apenas na espacialização dos recursos hídricos como também na capacidade de retenção de sedimentos, contribuindo para que os reservatórios de jusante tenham uma vida útil maior.

4.8.3. Variabilidade na capacidade de armazenamento do sistema

A variabilidade da capacidade de armazenamento da bacia hidrográfica do reservatório Pentecoste foi estimada pelo modelo simplificado considerando o cenário com 733 reservatórios da bacia, para os 54 anos de simulação (1957-2010). A Figura 28 abaixo mostra o decaimento da capacidade de armazenamento do sistema, considerando todos os reservatórios da bacia, e aquele derivado do assoreamento apenas do açude Pentecoste, durante o período da simulação.

Figura 28 – Decaimento da capacidade de armazenamento na bacia e no açude Pentecoste



Como se pode observar na Figura 28, a redução na capacidade de armazenamento hídrica ocorre de forma mais acentuada no sistema como um todo do que a observada no reservatório Pentecoste. Isso se deve ao fato de os demais reservatórios da bacia reterem grande parte do sedimento, cerca de 58%, atenuando assim, o assoreamento do Pentecoste.

CONCLUSÕES

- A comparação entre o volume medido e o volume calculado pelo método de Molle demonstrou uma ótima correlação e um coeficiente de Nash-Sutcliffe de 0,81. Assim é possível constatar que a Equação de Molle aplica-se bem à região estudada.
- O levantamento da açudagem na bacia de Pentecoste mostrou uma pequena evolução temporal no número de reservatórios no período avaliado 1985-2004, variando de 623 para 733 reservatórios.
- O volume armazenado total na bacia estimado foi de 621,33 hm³, tendo ocorrido acréscimo de 7,41% no período analisado. A classe 5 (com volume superior a 100 hm³) detém o maior volume armazenado dentro da bacia, apesar de ter apenas um reservatório, o açude Pentecoste.
- Foi observada uma taxa de erosão média localizada na bacia de 59 t.ha⁻¹.ano⁻¹, sendo que 42% da área da bacia apresenta grau de erosão moderado.
- De acordo com o modelo, o assoreamento do reservatório Pentecoste pode variar de 1,08 a 2,6% por década, dependendo do cenário considerado. Observa-se ainda que os reservatórios de montante podem reter até 58% do sedimento que chegaria ao açude Pereira de Miranda.
- Os reservatórios muito pequenos, com capacidade de até 0,1 hm³, embora representem apenas 1,83% da disponibilidade hídrica do sistema, são capazes de reter quase 8% do total de sedimento produzido. Análises de sensibilidade mostram que a capacidade de retenção de sedimentos nos reservatórios de montante pode variar de 20 a 58%, dependendo da estrutura do sistema quanto à existência de reservatórios de diferentes classes de tamanho.
- Constata-se ainda que a taxa de redução da capacidade de armazenamento hídrica do sistema em função do assoreamento dos reservatórios da bacia é relativamente maior do que a observada para o açude Pereira de Miranda, devido à retenção de sedimentos a montante.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA; AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Introdução ao Gerenciamento de Recursos Hídricos**. 2a ed. Arnaldo Augusto Setti; Jorge Enoch Furquim Werneck Lima; Adriana Goretti de Miranda Chaves; Isabella de Castro Pereira. Brasília, 2001. 328 p;

AGUIAR M.DE J.; VIANA, T. V.DE A.; AGUIAR J. V. DE; CRISÓSTOMO JÚNIOR, R. R. FRANCISCO AQUINO, F. C DE; BARRETO JÚNIOR, J. H. C. **Dados climatológicos: Estação de Pentecoste**, 2003. EMBRAPA. Outubro 2004.

ALVES, M. **Estimativa da perda de solo por erosão laminar na bacia do rio São Bartolomeu - DF, usando técnicas de geoprocessamento**. São José dos Campos: INPE, 2000. p.33

ARAÚJO, J. C. de. Assoreamento em Reservatórios do Semi-árido: Modelagem e Validação. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. V. 8 n.2 Abr/Jun 2003, 39–56

ARAÚJO, J. C.; LIMA NETO, I. E. ; WIEGAND, M. C. ; MALVEIRA, V. T. C. . Impact of a dense reservoir network on water availability in the semiarid north-eastern Brazil. In: *Hydropredict 2010*, 2010, Praga. Proceedings. Wallingford : IAHS, 2010. v. 1.

ARAÚJO, J. C.; GUENTNER, A.; BRONSTERT, A. . Loss of reservoir volume by sediment deposition and its impact on water availability in semiarid Brazil. **Hydrological Sciences Journal**, Wallingford, v. 51, n. 1, p. 157-170, 2006.

ARIDAS, PROJETO (1994). Recursos hídricos e o desenvolvimento sustentável do semi-árido nordestino. Relatório consolidado, Secretaria de planejamento da Presidência da República, Brasília, Brasil.

ARS/USDA. **Predicting Soil Erosion by Water – A Guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)**. USA Washington, 384 p. 1994.

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 6457: **Amostras de Solo: Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização**. Rio de Janeiro, ago 1986.

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

ATLAS ELETRÔNICO DOS RECURSOS HÍDRICOS DO CEARÁ. **SRH**. Disponível em:<<http://atlas.srh.ce.gov.br/>>. Acesso em 10.01.2012.

AVILA, L. O. de; NUMMER, A.; PINHEIRO, R. J. B. **VI Seminário Latino-Americano de Geografia Física II** Seminário Ibero-Americano de Geografia Física da Universidade de Coimbra, Maio de 2010.

BASTOS, C.A.B. (1999) **Estudo geotécnico sobre a erodibilidade de solos residuais não saturados**. 256 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

BAZZANO, M. G. P; ELTZ, , F. L. F.; CASSOL, E. A. erosividade e características hidrológicas das chuvas de Rio Grande (RS). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, p. :235-244, 2010

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. **R. Bras. Ci. Solo**, v. 25, p. 451-461, 2001.

BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. **Conservação do solo**. São Paulo: Editora Ícone, 1990, 335 p.

BICALHO, C. C. **Estudo do transporte de sedimentos em suspensão na bacia do rio Descoberto**. 123 p Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos) – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2006.

BRANCO, N. **Avaliação da produção de sedimentos de eventos chuvosos em uma pequena bacia hidrográfica rural de encosta**. 1998. 135 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Departamento de Engenharia Rural, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 1998.

BRUNE, G. M. (1953). *Trap Efficiency of Reservoirs*. Trans. American Geophysical Union. Vol. 34, n.3, June.

BUENO, C. R. P.; ARRAES, C. L.; MIQUELONI, D. P. Aplicação do sistema de informação geográfica para determinação do fator topográfico em bacias hidrográficas. **Revista Brasileira de Tecnologia Aplicada nas Ciências Agrárias**, Guarapuava-PR, v.4, n.2, p.30 – 47, 2011.

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

CARVALHO, N.O; FILIZOLA JÚNIOR, N.P; SANTOS, P.M.C; LIMA, J.E.F.W. **Guia de avaliação de assoreamento de reservatórios**. Brasília: ANEEL. 2000. 140p.

CEARÁ, Decreto nº 23.068, de 11 de Fevereiro de 1994. Dispõe sobre a classificação dos açudes quanto sua capacidade de acumulação de água. **Diário Oficial do Estado** – DOE de 18 de Fevereiro de 1994.

CEARÁ. Assembleia Legislativa. Caderno regional da bacia do Curu / Conselho de Altos Estudos e Assuntos Estratégicos, Assembleia Legislativa do Estado do Ceará; Eudoro Walter de Santana (Coordenador). – Fortaleza : INESP, 2009.

CEARÁ. Secretaria dos Recursos Hídricos. **Plano Estadual de Recursos Hídricos (Planerh)**. Fortaleza: SRH, 2005.

CHARTRES, C; WILLIAMS, J. Can Australia Overcome its Water Scarcity Problems? **Journal of Developments in Sustainable Agriculture**. 2006.

CIRILO, J. A. ; MONTENEGRO, S.M.G.L. ; CAMPOS, J. N. B. **A questão da água no semiárido brasileiro**. In: Bicudo, C.E. de M; Tundisi, J.G.; Scheuenstuhl, M.C.B.. (Org.). *Águas do Brasil análises estratégicas*. 1 ed. São Paulo: Instituto de Botânica, 2010, v. 1, p. 81-91.

CREPANI, E; MEDEIROS, J. S. DE; PALMEIRA, A. F. **intensidade pluviométrica: uma maneira de tratar dados pluviométricos para análise da vulnerabilidade de paisagens à perda de solo**. São José dos Campos, 30 p. INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2004 (INPE-11237-RPQ/760).

CREUTZFELDT, B. N. A. (2006). *Remote sensing based characterisation of land cover and terrain properties for hydrological modelling in the semi-arid Northeast of Brazil*. Dissertação de mestrado – Instituto de Geoecologia, Universidade de Postdam Alemanha. 104f

CRUZ, P. H. COIMBRA, R. M., FREITAS, M. A. V. Vulnerabilidade climática e recursos hídricos no Nordeste. In.: O ESTADO DAS ÁGUAS NO BRASIL/ org. Marcos Aurélio Vasconcelos de Freitas – Brasília, DF: ANEEL, SIH; MMH, SRH; MME, 1999. 334p.

CUNHA, K. L. **Diagnóstico das áreas suscetíveis à erosão na bacia hidrográfica do Ribeirão São Bartolomeu (Viçosa –MG) como subsídio à conservação do solo e da água**. 2006. 74 f. Monografia (Graduação em Geografia) – Centro de Ciências Humanas, Artes e Letras, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2006.

DUVERT, C. *et al.* Drivers of erosion and suspended sediment transport in three headwater catchments of the Mexican Central Highlands. **Geomorphology**, v. 123, n. 3-4, p. 243-256, 2010. ISSN 0169-555X.

FAO. **Metodologia provisional para evaluation de la degradacion de los suelos**. FAO/PNUMA. UNEP. UNESCO. Roma. 1980. 86 p.

FARIAS, I.C. (1984). **Guia para la elaboración de estudios del médio físico**: contenido y metodologia. 2.ed. Centro de Estudios de Ordenación del Territorio Y Medio Ambiente. Serie Manuales 3. Madrid: GEOTMA.

FARINASSO, M., CARVALHO NETO, O. A. de, 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 SIGg para os cálculos dos seus fatores na região do Alto Parnaíba – PI-MA. **Revista Brasileira de Geomorfologia** - Ano 7, nº 2 (2006).

FIETZ, C.R. ÁGUA, o recurso natural do terceiro milênio. **A lavoura**. Junho 2006

FOURNIER, F. **Climat et erosion: la relation entre l'erosion du sol par l'eau et les precipitations atmospheriques**. Paris: Presses Universitaires de France, 1960. 201p.

FREIRE O.; PESSOTTI, J. E. S. **Erodibilidade de alguns solos de Piracicaba- SP**. In: Encontro Nacional de Pesquisa sobre Conservação do Solo, EMBRAPA - CNPT, Passo Fundo, p. 481. 1978.

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

GUERRA, A. J. T. Processos erosivos nas encostas. In: GUERRA, A. J. T.; CUNHA, S. B. **Geomorfologia: uma atualização de bases e conceitos**. 3. ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1995. p. 149-209

HERNANI et al. **A erosão e seu impacto**. In: Manzatto, C. V.; Freitas Júnior, E.; Peres, J. R. R. (ed.) **Uso agrícola dos solos brasileiros**. Rio de Janeiro: EMBRAPA, 2002. 174p.

HUDSON, N. W. **Soil conservation**. Ithaca: Cornell University Press, 1973. 320p

ICOLD, I. C. O. L. D. **Sedimentation control of reservoirs/Maîtrise de l'alluvionnement des retenues**. Committee on Sedimentation of Reservoirs. Paris., 1989.

LAL, R. Erodibility and erosivity. In: LAL, R. **Soil erosion research methods**. Ankeny: SWCS, 1988. p.141-160.

LAL, R., 1994. **Soil Erosion Research Methods**. Soil and Water Conservation Society (Ankeny), 3rd ed. St. Lucie Press, Delray Beach.

LIMA NETO, I. E.; WIEGAND, M. C.; DE ARAÚJO, J. C.(2011) Sediment redistribution due to a dense reservoir network in a large semi-arid Brazilian basin, **Hydrological Sciences Journal**, 56: 2, 319 — 333

LIMA, L.H. (2001). O Dia mundial da água. **Jornal O Globo**. Suplemento O Dia Mundial da Água. Rio de Janeiro, 22/03/2001

LOMBARDI NETO, F.; MOLDENHAUER, W.C. **Erosividade da chuva: sua distribuicao e relacao com perdas de solo em Campinas, SP**. *Bragantia*, Campinas, v. 51, n. 2, p. 189-196, 1992.

LÓPEZ-TARAZÓN, J. A. et al. Suspended sediment transport in a highly erodible catchment: The River Isábena (Southern Pyrenees). *Geomorphology*, v. 109, n. 3-4, p. 210-221, 2009. ISSN 0169-555X.

LYRA, D.L.; SOUSA, D.C.B.; MAMEDE, G.L. Impacto das variações climáticas sobre a disponibilidade hídrica em reservatórios do Nordeste brasileiro: Estudo de caso para a bacia do açude Santa Cruz do Apodi-RN. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE SEDIMENTOS, 9., 2010. Brasília. **Anais...** Brasília: ABRH, 2010. 9p.

MAIA, A. G; VILLELA S. M. Análise do assoreamento do reservatório de Promissão através do modelo RESSASS. *Ambiência - Revista do Setor de Ciências Agrárias e Ambientais* V. 5 N. 2 Maio/Ago. 2009.

MALVEIRA, V. T. C. **Pequena açudagem e sustentabilidade hidrológica em grandes bacias semi-áridas**: estudo de caso da bacia do açude Orós. Dissertação de mestrado, (Engenharia civil, área de concentração recursosos hidricos) Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental. 2009.

MAMEDE, G. L. (2008). *Reservoir Sedimentation in dryland catchments: modelling and management*. Tese (Doutorado em Natural Sciences) –Department of Geocology Chair for Hydrology and Climatology, University of Potsdam, Alemanha.

MAMEDE, G. L.; ARAUJO, J. C. ; MEDEIROS, P. H. A. . Modelagem hidrossedimentológica de pequenos reservatórios da bacia hidrográfica do Benguê. In: Carlos Nobuyoshi Ide; Luiz Augusto Araújo do Val; Maria Lúcia Ribeiro. (Org.). **Produção de sedimentos e seus impactos ambientais**, sociais e econômicos. Campo Grande: Editora Oeste, 2009, v. , p. 393-410.

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

MARINS, A. P. P., E. M. C. D. ; TASSI, R. A influência do assoreamento na variação dos níveis do Reservatório do Vacacaí-Mirim / Santa Maria - RS. **VI Encontro Nacional de Engenharia de Sedimentos**, v. 1, p. 1-4, 2004.

MIRANDA, T. C.; Bastos, C. A. B.; Tassi, R. Avaliação do Potencial Erosivo e da Geração de Sedimentos em Microbacias Contribuintes a Estruturas de Drenagem Rodoviária. In: Encontro Nacional de Engenharia de Sedimentos. 7., 2006, Porto Alegre. **Anais...** Porto Alegre: UFRGS, 2006. 1 CR-ROM.

MOLLE, F. *Evapotranspiration and infiltration losses in small reservoirs..* Série Hidrologia, 25, SUDENE / ORSTOM, Recife, Brazil, 1989.

MORAIS, L.F.B.; MUTTI, L.S.M.; ELTZ, F.L.F. Índices de erosividade correlacionados com perdas de solo no Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.12, n.3, p.281-284, set./dez. 1988.

MORAIS, L.F.B.; SILVA, V.; NASCHENVENG, T.M.C.; HARDOIN, P.C.; ALMEIDA, J.E.L.; WEBER, O.L.S.; BOEL, E.; DURIGON, V. Índice EI30 e sua relação com o coeficiente de chuva do sudoeste do Mato Grosso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.15, n.3, p.339-344, set./dez. 1991.

MORRIS, G. L.; FAN, J. (1997). **Reservoir Sedimentation Handbook**, McGraw-Hill, New York.

NASH, J. E. and J. V. SUTCLIFFE. *River flow forecasting through conceptual models part I - A discussion of principles*, **Journal of Hydrology**, 10 (3), 282-290, 1970.

OLIVEIRA JÚNIOR, R.C.; MEDINA, B.F. A erosividade das chuvas em Manaus (AM). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.14, n.2, p.235-239, maio/ago. 1990.

PETER, S. J. **High Density Reservoir Network in North-Eastern Brazil: Investigation on the Connectivity Pattern**. 2011. 59 f. Dissertação. *Institute of Environmental Engineering at ETH Zurich*.

PRUSKI, Conservação de solo e água: práticas mecânicas para o controle da erosão hídrica / Fernando Falco Pruski, editor – 2. Ed. atual. e ampl. – Viçosa: Ed. UFV, 2009. 279p.

REBOUÇAS, Aldo da C. **Água no Brasil: abundância, desperdício e escassez**. Bahia Análise & Dados-Recursos Hídricos, Salvador: SEI, v.13, n.especial, p. 341-345, 2003

ROCHA, J.V.; LOMBARDI NETO, F.; BACELLAR, A.A.A. Metodologia para determinação do fator comprimento de rampa (L) para a Equação Universal de Perdas de Solo. In: I SIMPÓSIO DE USUÁRIOS IDRISI, p.3-6, Campinas-SP, 1996.

SETTI, A. A.; LIMA, J. E. F.; CHAVES, A. G. M.; PEREIRA, I. C. **Introdução ao Gerenciamento de Recursos Hídricos**. Agência Nacional da Água. 2 ed. Brasília, 2000.

SILVA, A. M. da; SCHULZ, H. E. Estimativa do fator “C” da EUPS para cobertura morta de resíduos vegetais de origem urbana para as condições de São Carlos (SP, Brasil) **Interciencia**, diciembre 2001, v. 26, n. 12 Asociación Interciencia Caracas, Venezuela p. 615-618, 2001.

SILVA, A.M. da; SCHULZ, H.E.; CAMARGO, P.B. **Erosão e hidrossedimentologia em bacias hidrográficas**. São Carlos: Editora Rima, 2003, 138 p.

SOUSA, D. C. B. ; LYRA, D. L. ; MAMEDE, G. L. . Variabilidade espacial da disponibilidade hídrica superficial na bacia hidrográfica do açude Santa Cruz. In: III Workshop Internacional de Inovações Tecnológicas na Irrigação e II Conferência sobre Recursos Hídricos do Semiárido Brasileiro, 2010, Fortaleza. MS. Anais do III Workshop Internacional de Inovações Tecnológicas na Irrigação, 2010.

SOUSA, D. C. B. ; REINALDO, G. P. B. ; COSTA, T. K. G. ; DANTAS, K. K. C. ; MAMEDE, G. L. ; Silva, P.C.M. . Estimativa de assoreamento dos reservatórios da bacia hidrográfica do açude Santa Cruz do Apodi-RN. In: XIX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2011, Maceió. Anais do XIX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2011

SOUTO, A. R. **Análise espacial e temporal da produção de sedimentos em uma microbacia rural com o modelo AGNPS e técnicas de SIG**. Escola de Engenharia de São Carlos – USP. **Dissertação de Mestrado**. Maio, 1998.

SOUZA, C.K. Relação solo-paisagem-erosão e variabilidade espacial de Latossolos em áreas sob cultivo de cana-de-açúcar no município de Jaboticabal (SP). Jaboticabal, Universidade Estadual Paulista, 2001. 186p. (Tese de Mestrado)

SOUZA, C.K. et al. Influência do relevo e erosão na variabilidade espacial de um Latossolo em Jaboticabal (SP). *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v.27, n.6, p.1067-1074, 2003.

SRH, Plano Estadual dos Recursos Hídricos. Diagnóstico, Secretaria dos Recursos Hídricos, v.1, Governo do Estado do Ceará, Fortaleza, Brasil. 1992.

TUNDISI, J. G. . O Futuro dos Recursos - Recursos Hídricos. *MultiCiência: Revista Interdisciplinar dos Centros e Núcelos da UNICAMP*, Campinas -, p. 1 - 10, 11 nov. 2003.

VESTENA, L. R. Análise da relação entre a dinâmica de áreas saturadas e o transporte de sedimentos em uma bacia hidrográfica por meio de monitoramento e modelagem. 2008. 268 f. Tese (Doutorado em Engenharia Ambiental) – Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.

WEILL, M. A. M.; SPAROVEK, G. Estudo da erosão na microbacia do Ceveiro (Piracicaba, SP). i - estimativa das taxas de perda de solo e estudo de sensibilidade dos fatores do modelo EUPS. **R. Bras. Ci. Solo**, v. 32, p. 801-814, 2008.

WISCHMEIER, W.H., SMITH, D.D., 1978. **Predicting rainfall erosion losses**. USDA Agr. Res. Serv. Handbook, 537.

WISCHMEIER, W.H.; JOHNSON, C. B.; CROSS, V. A soil erodibility nomograph for farmland and construction sites. **Journal of Soil and Water Conservation**, v. 5, n. 5, p. 189-193, 1971.

WISCHMEIER, W.H; SMITH, D. .D. Rainfall energy and its relationship to soil loss. **Transaction, American Geophysical Union**, v. 39, n.2, p.285-280,1958.

WÜNSCHE, A., DENARDIN, J.E. **Conservação e manejo dos solos. In: Planalto Riograndense, considerações gerais**. 1 . Passo Fundo, EMBRAPA. CNPT, 1980. 17 p. (EMBRAPA, CNPT, Circular técnica, 2).

ZACHAR, D. **Soil Erosion**. Bratislava (Czechoslovakia): Elsevier, Developments in Soil Science, 1982, n. 10, 547 p.

ZHANG, K. L. et al. Soil erodibility and its estimation for agricultural soils in china. *Journal of Arid Environments* [S.I.], v. 72, n. 6, p. 1002-1011, 2008.