

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA**  
**PROGRAMA DE MESTRADO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA**  
**ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: MANEJO E CONSERVAÇÃO DE BACIAS**  
**HIDROGRÁFICAS NO SEMIÁRIDO**

**ADRISSA MENDES FIGUEIRÓ**

**MAPA DE SUSCEPTIBILIDADE À EROSÃO E ANÁLISE MORFOMÉTRICO-  
AMBIENTAL DA BACIA DO RIACHO SÃO JOSÉ, CEARÁ**

**FORTALEZA - CE**  
**2011**

ADRISSA MENDES FIGUEIRÓ

MAPA DE SUSCEPTIBILIDADE À EROSÃO E ANÁLISE MORFOMÉTRICO-  
AMBIENTAL DA BACIA DO RIACHO SÃO JOSÉ, CEARÁ

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado em Engenharia Agrícola, Centro de Ciências, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Agrícola. Área de concentração: Manejo e Conservação de Bacias Hidrográficas no Semiárido.

Orientador: Prof. Dr. Luiz Alberto Ribeiro Mendonça

Co-orientador: Prof. Dr. José Carlos de Araújo

FORTALEZA - CE

2011

F494m Figueiró, Adrissa Mendes  
Mapa de susceptibilidade à erosão e análise morfométrico-ambiental da  
bacia do Riacho São José, Ceará / Adrissa Mendes Figueiró.  
106f. : il. color. enc.

Orientador: Prof. Dr. Luiz Alberto Ribeiro Mendonça  
Coorientador: Prof. Dr. José Carlos de Araújo  
Área de concentração: Manejo e Conservação de Bacias Hidrográficas  
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Ceará, Centro de  
Ciências Agrárias. Depto. de Engenharia Agrícola, Fortaleza, 2011.

1. Erosão 2. Solos erosão I. Mendonça, Luiz Alberto Ribeiro (orient.) II.  
Araújo, José Carlos de (coorient.) III. Universidade Federal do Ceará – Curso  
de Mestrado em Engenharia Agrícola IV. Título

CDD 630

ADRISSA MENDES FIGUEIRÓ

MAPA DE SUSCEPTIBILIDADE À EROÇÃO E ANÁLISE MORFOMÉTRICO-  
AMBIENTAL DA BACIA DO RIACHO SÃO JOSÉ, CEARÁ

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 Mestre em Engenharia Agrícola. Área de concentração Manejo e Conservação de Bacias Hidrográficas no Semiárido.

APROVADA EM: 01 de Março de 2011

BANCA EXAMINADORA:

---

Prof. Dr. Luiz Alberto Ribeiro Mendonça (Orientador)  
Universidade Federal do Ceará - UFC

---

Prof. Dr. José Carlos de Araújo (Co-orientador)  
Universidade Federal do Ceará - UFC

---

Profª. Dra. Ana Patrícia Nunes Bandeira (Conselheira)  
Universidade Federal do Ceará – UFC

Dedico este trabalho aos meus pais Adason e Herbene, um exemplo de superação e amor, aos meus irmãos Alysson e Adason Filho e aos meus sobrinhos presentes que Deus me concedeu.

"Quando agredida, a natureza não se defende.  
Apenas se vinga."

Albert Einstein

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus fonte inesgotável de sabedoria, fiel e misericordioso, responsável por minha existência e por iluminar meu caminho nas horas mais difíceis;

A minha Mãe Maria Herbene Mendes Figueiró. Você que me ensinou desde cedo a nunca desistir independente do obstáculo enfrentado, ao meu pai Adason Duarte Figueiró, aos meus irmãos queridos Adason Filho e Alysson Figueiró, agradeço por estarem sempre ao meu lado encorajando, mas principalmente pelo amor que sempre me dedicaram. A vocês toda a minha gratidão!

Ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia (IFETCE), pelo incentivo dado quando da vinda ao mestrado;

À Universidade Federal do Ceará, através do departamento de Engenharia Agrícola pela oportunidade oferecida à realização desse curso;

Ao meu orientador e amigo Professor Dr. Luiz Alberto Ribeiro Mendonça que me acolheu nesta jornada contribuindo para a execução desta obra, pela brilhante orientação, paciência, amizade, mas principalmente, pela confiança em mim depositada; À UFC – Campus Cariri pela estrutura disposta ao desenvolvimento desse estudo;

À Vanda Malveira e Adbeel Goes do Departamento Nacional de Obras Contra as Secas pela disponibilidade de informações à vinda ao Mestrado;

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo apoio financeiro através da concessão da bolsa de estudo;

Ao professor e coordenador do Curso de Pós Graduação em Engenharia Agrícola José Carlos de Araújo, pelo apoio, dedicação e amizade;

À Marina Silva e Lucíola Félix pela boa receptividade em sua residência no Crato e apoio durante o primeiro período de meu trabalho;

A todos os Professores do Curso de Mestrado em Engenharia Agrícola, que colaboraram indiretamente para este estudo através da formação de conhecimento;

Aos funcionários do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal do Ceará pelo carinho;

Ao Laboratório de Física do Solo no Departamento de Ciências do Solo, na pessoa de Francisco José da Silva (Franze), por proporcionar auxílio nas análises realizadas para o desenvolvimento dessa pesquisa.

Ao Instituto Brasileiro do Meio Ambiente (IBAMA) – Crato, na pessoa de Verônica Maria de Figueiredo Lima, pelo apoio necessário ao desenvolvimento da pesquisa.

Aos alunos de Iniciação Científica Campus Cariri Sanne Andersson de Moura Araújo, Antônio Alisson Fernandes Simplício, Mário Renan de Oliveira Romão e Paulo Ricardo Alves dos Santos pelo companheirismo e preciosa ajuda para realização das coletas das amostras.

Ao senhor Edílson Lobo por nos conduzir de “mata à dentro” na coleta de amostra.

Aos amigos de Mestrado: Fernando Lopes, Viviane Lacerda, Luiz Carlos, Joseilson Oliveira, José Vidal, Francisco Lobato, Sávio Fontenele, Dirceu Duarte, Adriana Oliveira, Cicero Almeida, Raimundo Nonato, Danielle Araújo e os demais pela convivência e laços de amizade.

Agradeço aos professores e colegas pelas novas amizades, e pela oportunidade em conviver com excelentes profissionais.

Ao meu noivo, pelo carinho, compreensão e apoio técnico na redação desta pesquisa;

Aos meus familiares e amigos que passaram pela minha vida e que contribuíram de alguma forma para o meu crescimento e minhas conquistas. E, finalmente, meu carinho a todos àqueles que direta ou indiretamente durante este tempo estiveram ao meu lado torcendo por mim.

## SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

RESUMO

ABSTRACT

<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>15</b>
<b>1.1. Caracterização do problema.....</b>	<b>15</b>
<b>1.2. Objetivos.....</b>	<b>17</b>
<b>2. REVISÃO DE LITERATURA.....</b>	<b>18</b>
<b>2.1. Bacias hidrográficas .....</b>	<b>18</b>
<b>2.2. Erosão do solo .....</b>	<b>20</b>
2.2.1. Erosão hídrica.....	22
2.2.2. Agentes erosivos .....	25
<b>2.3. Variabilidade espacial de fatores de erosão .....</b>	<b>30</b>
<b>2.4. Equação Universal da Perda de Solo (USLE) .....</b>	<b>31</b>
<b>2.5. Erodibilidade do solo (K) .....</b>	<b>32</b>
<b>2.6. Avaliação do índice de erodibilidade do solo e identificação de         impactos ambientais .....</b>	<b>35</b>
<b>2.7. Análise morfométrica e geomorfologia de bacias hidrográficas.....</b>	<b>36</b>
<b>2.8. Análise morfométrica na avaliação de impactos ambientais.....</b>	<b>37</b>
<b>2.9. Susceptibilidade à erosão do solo.....</b>	<b>38</b>
<b>3. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA.....</b>	<b>40</b>
<b>3.1. Localização.....</b>	<b>40</b>
<b>3.2. Características climáticas.....</b>	<b>42</b>
<b>3.3. Solo.....</b>	<b>43</b>
<b>3.4. Morfologia .....</b>	<b>45</b>
<b>3.5. Vegetação/uso e ocupação do solo.....</b>	<b>45</b>
<b>3.6. Recursos hídricos.....</b>	<b>47</b>
<b>4. MATERIAL E MÉTODOS.....</b>	<b>50</b>
<b>4.1. Delimitação da bacia hidrográfica .....</b>	<b>50</b>
<b>4.2. Parâmetros morfométricos.....</b>	<b>50</b>
4.2.1. Forma da bacia .....	50
4.2.1.1. Fator de forma .....	50

4.2.1.2. Coeficiente de compacidade .....	51
4.2.2. Relevo da bacia .....	51
4.2.2.1. Declividade média da bacia .....	52
4.2.2.2 Declividade média do curso principal .....	52
4.2.3. Sistema de drenagem.....	53
4.2.3.1. Razão de bifurcação.....	53
4.2.3.2. Densidade de drenagem.....	54
<b>4.3. Erodibilidade do solo.....</b>	<b>54</b>
<b>4.4. Obtenção dos parâmetros utilizados na determinação da erodibilidade</b>	<b>58</b>
4.4.1. Pontos de amostragens e coletas de solo.....	58
4.4.2. Determinação da granulometria e do teor de matéria orgânica...	60
<b>4.4.3. Permeabilidade do solo.....</b>	<b>62</b>
<b>4.5. Variabilidade espacial dos dados.....</b>	<b>63</b>
<b>4.6. Critérios para mapeamento de classes de susceptibilidade à erosão do solo.....</b>	<b>65</b>
<b>5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>68</b>
<b>5.1. Caracterização morfométrica.....</b>	<b>68</b>
<b>5.2. Avaliação Ambiental.....</b>	<b>72</b>
<b>5.3. Parâmetros utilizados na determinação da erodibilidade do solo.....</b>	<b>77</b>
<b>5.4. Erodibilidade do solo da bacia do riacho São José.....</b>	<b>79</b>
<b>5.5. Análise geoestatística da erodibilidade do solo.....</b>	<b>81</b>
<b>5.6. Análise espacial da susceptibilidade à erosão do solo.....</b>	<b>84</b>
5.6.1. Mapa pedológico.....	84
5.6.2. Mapa de uso e ocupação do solo.....	86
5.6.3. Mapa de declividade.....	88
5.6.4. Mapa de erodibilidade.....	90
5.6.5. Mapa de susceptibilidade à erosão dos solos.....	92
<b>6. CONCLUSÃO.....</b>	<b>96</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>99</b>

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> - Área de contribuição de uma bacia hidrográfica .....	18
<b>Figura 2</b> - Esquema do processo de erosão hídrica .....	24
<b>Figura 3</b> - Localização da bacia hidrográfica do riacho São José .....	41
<b>Figura 4</b> - Precipitação anual nos municípios de Crato e Juazeiro do Norte.....	43
<b>Figura 5</b> - Mapas de classes de solos na bacia hidrográfica do riacho São José .....	44
<b>Figura 6</b> - Caatinga arbórea arbustiva e floresta úmida subperenifólia.....	45
<b>Figura 7</b> - Mapa de uso e ocupação do solo da bacia do riacho São José .....	45
<b>Figura 8</b> - Exutório da bacia do riacho São José .....	48
<b>Figura 9</b> - Visão panorâmica do riacho São José .....	49
<b>Figura 10</b> - Classificação da ordem dos rios segundo Strahler .....	54
<b>Figura 11</b> - Nomograma para determinação da erodibilidade K da EUPS.....	55
<b>Figura 12</b> - Pontos de amostragem para coleta de solos na área de estudo .....	59
<b>Figura 13</b> - Cilindros utilizados para extração das amostras .....	60
<b>Figura 14</b> - Amostragem de solo indeformado na bacia do riacho São José.....	60
<b>Figura 15</b> - Peneiras utilizadas na determinação das frações de solo.....	61
<b>Figura 16</b> - Amostras em cilindros de sedimentação .....	61
<b>Figura 17</b> - Dicromato de potássio sendo aquecido.....	61
<b>Figura 18</b> - Processo de titulação das amostras .....	61
<b>Figura 19</b> - Permeâmetro de carga variável.....	62
<b>Figura 20</b> - Delimitação da bacia hidrográfica do riacho São José .....	68
<b>Figura 21</b> - Altitude da bacia hidrográfica do riacho São José.....	70
<b>Figura 22</b> - Curva hipsométrica da bacia do riacho São José.....	70
<b>Figura 23</b> - Localização e ilustração dos aspectos ambientais da área de estudo.....	73
<b>Figura 24</b> - Disposição inadequada de resíduos sólidos e expansão urbana encontrados em área urbana na bacia do riacho São José .....	74
<b>Figura 25</b> - Riacho São José assoreado .....	74
<b>Figura 26</b> - Presença de voçoroca e corte com remoção de sedimentos .....	75
<b>Figura 27</b> - Área de agricultura na bacia do riacho São José .....	75
<b>Figura 28</b> - Área de produção agroextrativista .....	76
<b>Figura 29</b> - Variogramas dos dados de erodibilidade obtidos pelo modelo teórico esférico .....	82

<b>Figura 30</b> - Representação gráfica das isolinhas de erodibilidade, geradas através de interpolação por krigagem pontual com uso do modelo esférico .....	84
<b>Figura 31</b> - Classes de susceptibilidade à erosão para cada tipo de solo.....	85
<b>Figura 32</b> - Classes de uso e ocupação do solo .....	87
<b>Figura 33</b> - Classes de declividade .....	89
<b>Figura 34</b> - Classes de potencial a erodibilidade .....	91
<b>Figura 35</b> - Mapa de susceptibilidade à erosão da bacia do riacho São José .....	93

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1</b> - Susceptibilidade à erosão de acordo com o tipo de solo .....	29
<b>Tabela 2</b> - Classes de estrutura do solo.....	56
<b>Tabela 3</b> - Classes de permeabilidade em relação a textura e condutividade hidráulica do solo.....	57
<b>Tabela 4</b> - Classes do potencial à erodibilidade .....	57
<b>Tabela 5</b> - Pontos amostrados georreferenciados .....	58
<b>Tabela 6</b> - Pesos de acordo com tipo de solo e classes de erodibilidade .....	65
<b>Tabela 7</b> - Pesos de acordo com uso e ocupação .....	66
<b>Tabela 8</b> - Pesos de acordo com as classes de declividade em relação ao relevo.....	67
<b>Tabela 9</b> - Pesos em relação as classes de susceptibilidade à erosão e a erodibilidade..	67
<b>Tabela 10</b> - Síntese dos parâmetros morfométricos obtidos para a bacia do riacho São José.....	69
<b>Tabela 11</b> - Teor de matéria orgânica, granulometria e permeabilidade das amostras dos solos coletadas na bacia do riacho São José.....	77
<b>Tabela 12</b> - Tipos de solos, erodibilidade e classificação nos pontos de amostragem da área em estudo .....	79
<b>Tabela 13</b> - Estatística comparativa da modelagem geoestatística por krigagem pontual.....	81
<b>Tabela 14</b> - Modelos de variogramas e parâmetros ajustados aos dados de erodibilidade do solo.....	82
<b>Tabela 15</b> - Classificação do grau de susceptibilidade a erosão .....	94

## RESUMO

A erosão é um processo natural no desenvolvimento da paisagem quando é produzida pela ação do vento ou da água, sem interferências antrópicas. Normalmente, as ações antrópicas, sob determinadas condições de clima, vegetação, solos e relevo, aceleram os processos erosivos. No presente trabalho, foi feita a caracterização da erodibilidade, o estado ambiental, a morfometria e a elaboração do mapa de susceptibilidade à erosão do solo da bacia do riacho São José na região do Cariri cearense, buscando encontrar associação entre essas categorias. Os parâmetros morfométricos indicaram que a bacia apresenta-se pouco susceptível a enchentes, em condições normais de precipitação, por apresentar forma estreita, alongada e irregular e baixa declividade média relativa à do rio principal. No campo, observaram-se problemas ambientais mais proeminentes na zona urbana, ocasionados pelo aumento do escoamento superficial, e na zona de pecuária e agricultura irrigada, onde há processos erosivos por voçoroca. A granulometria dos solos coletados em zonas de agropecuária, agricultura irrigada, caatinga arbustiva e agroextrativismo apresentaram maior percentual de areia fina, enquanto que em zonas urbanas e de floresta o maior foi de areia média. Os maiores teores de silte foram encontrados em duas amostras, uma na zona de agroextrativismo e outra na de floresta, e os menores em uma amostra na de agricultura irrigada. Os solos da zona de floresta, classificados como latossolos vermelho-amarelo, apresentaram permeabilidade elevada e maiores teores de matéria orgânica e argila que os dos demais solos, classificados como argissolos vermelho-amarelo e neossolos. Na zona urbana os solos apresentaram permeabilidade moderada a alta e nas demais, alta. Os solos das diferentes zonas foram classificados como de muito baixa erodibilidade, com exceção de duas amostras: uma da zona urbana e outra da de agroextrativismo, que foram classificados como baixa. A estimativa de valores de erodibilidade na área foi feita por krigagem pontual utilizando o modelo teórico esférico, escolhido por análise geoestatística. O mapa de susceptibilidade à erosão foi elaborado por meio da sobreposição dos planos de informação de pedologia, uso e ocupação do solo, declividade e erodibilidade na bacia. As avaliações ambientais associadas às informações obtidas do mapa de susceptibilidade, possibilitaram identificar áreas críticas mais susceptíveis à erosão. A bacia apresentou aproximadamente 35% da área caracterizada como de muito alta (16,2%) e alta (18,5%) susceptibilidade a erosão, indicando que o uso do solo está próximo a atingir os limites de susceptibilidade ambiental, principalmente por se encontrar em uma zona de conurbação bastante sensível aos processos erosivos. Esta fragilidade ambiental está associada principalmente ao uso e ocupação e à declividade do solo. A metodologia utilizada possibilitou identificar as áreas da bacia que devem merecer especial atenção por serem mais susceptíveis aos processos erosivos, podendo ser usada como um importante instrumento do planejamento ambiental.

Palavras chave: processos erosivos, erodibilidade, susceptibilidade a erosão dos solos.

## ABSTRACT

Erosion is a natural process of landscape evolution when it is brought about by wind or water, without human interferences. Anthropogenic actions, however, under certain conditions of climate, vegetation, soil and relief, accelerate erosion. This work, focusing on the soil of the basin of the São José creek in Cariri (in the Brazilian state of Ceará), was aimed at characterizing its erodibility, the state of its environment, and its morphology and aimed at eventually developing a map of its susceptibility to erosion, looking for any association between these traits. The morphometric parameters indicated that the basin has low susceptibility to flooding, under normal precipitation conditions, with its narrow, elongated, irregular shape and low average slope relatively to the main river. In the field, there were environmental problems more frequent in the urban area, caused by increased runoff, and in the area of irrigated agriculture and livestock, was observed the presence of gully erosion. The granulometries of soils collected in farming areas, areas of irrigated agriculture, areas of shrub savanna, and areas of mixed cultivation/extractivism presented higher percentages of fine sand, while in urban areas and forest areas the largest percentage was of middle grade sand. The highest levels of silt were found in two samples, one of the mixed cultivation/extractivism area and another of the forest area, while the lowest silt percentages were found in a sample of the irrigated agriculture area. The soils of the forest zone, classified as red-yellow Oxisols, showed fast permeability and higher levels of organic matter and clay than those of the other soils, classified as red-yellow eutrophic and Entisols. In urban areas, the soils showed moderate to rapid permeability while the soils of other areas showed faster permeability than that. The soils of the different zones were classified as soils of very low erodibility, except for two samples: one from the urban area and the other of the cultivation/extractivism area, which were classified as soils of low erodibility. The estimation of the erodibility in the area was made by punctual kriging using the spherical theoretical model, chosen by geostatistical analysis. The map of susceptibility to erosion was drawn through the superposition of information layers of soil science, land use, land cover, slope, and erodibility in the basin. Environmental assessments associated with the information obtained from the susceptibility map, allowed to identify the critical areas (more susceptible to erosion). The basin had about 35% of its area susceptible to erosion, with 16.2% of its area with very high and 18.5% of its area with high susceptibility to erosion, indicating that the soil use is close to reaching the limits of environmental susceptibility, especially because it is in a conurbation area that is very sensitive to the erosive processes. This environmental susceptibility is mainly associated with the use, slope and occupation of the soil. The methodology that we used enabled us to identify areas of the basin that deserve special attention for being more susceptible to erosion and can therefore be used as an important tool in environmental planning.

Key words: erosive processes, erodibility, soil susceptibility to erosion.

## 1 INTRODUÇÃO

Ao longo das últimas décadas, a conscientização da necessidade de compreender a interrelação entre as atividades humanas e o meio ambiente vem crescendo. A dinâmica do mesmo é frequentemente modificada por atividades antrópicas, as quais vêm acentuando processos naturais, ou criando novos, com sérias implicações de ordem natural, social e econômica. Essa dinâmica interfere diretamente, segundo Benda et.al (2007), no processo erosivo e nesse contexto os estudos geoambientais podem se tornar grandes colaboradores, seja como fonte de dados ou no auxílio direto à resolução, previsão, planejamento ou prevenção de problemas ambientais.

Os principais componentes (solo, água, vegetação e fauna) coexistem em permanente e dinâmica interação, respondendo às interferências naturais e àquelas de natureza antrópica, afetando os ecossistemas como um todo. Nesses compartimentos naturais, bacias hidrográficas e os recursos hídricos constituem indicadores das condições dos ecossistemas, no que se refere aos efeitos do desequilíbrio das interações dos respectivos componentes (SOUZA et al., 2002).

A erosão apresenta-se como um grande problema ambiental para a sociedade que por sua vez, contribui na maioria das vezes para a aceleração e dinamização dos processos erosivos, além de gerar queda na produtividade agrícola, compromete também a qualidade dos rios, acentuando processos de assoreamento e enchentes, afetando principalmente a população de baixa renda de países subdesenvolvidos.

A susceptibilidade do solo à erosão pode ser indicada por parâmetros físicos e químicos, processos biológicos e antropogênicos. Os parâmetros antropogênicos, como a conversão da cobertura vegetal em outros usos, principalmente agropecuários, são responsáveis por expressivas alterações do ambiente natural e mudanças na paisagem que, intensificadas, podem levar à degradação. Os impactos provocados se expressam de forma direta e indiretamente, como a perda de fertilidade e estrutura do solo, o assoreamento e a contaminação dos recursos tais como água e solo, a redução na biodiversidade, dentre outros fatores.

A ocorrência do equilíbrio entre os processos de formação do solo e seu desgaste natural, ocorre quando a erosão é considerada normal. Quando o processo erosivo é mais veloz que a formação do solo, havendo uma ruptura no equilíbrio natural do meio, ocorre a erosão acelerada ou antrópica, caso tenha sido provocada pela ação humana. Tal situação ocorre quando são encontradas determinadas condições de solo, litologia e relevo que proporcionam o desencadeamento da substituição da vegetação natural por outro tipo de cobertura vegetal, o qual não proporciona proteção eficiente contra a erosão, dificultando o estabelecimento do processo pedogenético que recomporia a camada erodida.

A erodibilidade é uma propriedade do solo que representa a sua susceptibilidade à erosão, enquanto que o fator erodibilidade do solo é representado pela relação entre a perda de solo e a erosividade da chuva, quando tais dados são obtidos individualmente para cada chuva. Tais quantificações são efetuadas nas condições de parcela padrão, que é a unidade fundamental de pesquisa de erosão, preconizada pela equação universal de perda de solo. Por outro lado, tolerância de perda representa a quantidade de solo que pode ser perdida pela erosão acelerada, expressa em unidade de massa por unidade de área no tempo, que mantém os seus níveis iniciais de fertilidade e com a equivalente produtividade, por longo período de tempo (WISCHMEIER; SMITH, 1965).

A análise morfométrica das bacias hidrográficas é uma ferramenta importante para definir os estágios de desenvolvimento de bacias de drenagem e nos fornece parâmetros relevantes para a avaliação do comportamento hidrológico. Esses parâmetros podem representar indicadores físicos específicos importantes, capazes de qualificarem as alterações ambientais ocorridas numa dada bacia hidrográfica. Determinação da drenagem, relevo e geologia podem acarretar uma melhor compreensão de questões associadas ao ambiente e nos trazem informações importantes sobre o manejo integrado dos recursos naturais na área.

Por outro lado, atualmente os problemas relacionados à degradação ambiental têm sido alvo da mobilização de dirigentes do setor público e de grupos representativos da sociedade civil, e, sem dúvida, dentre as questões ambientais, a erosão dos solos está entre as que tem causado maior preocupação (VITTE, 1997). Com isso, reforça-se a

necessidade da compreensão dos fatores responsáveis pela erosão a fim de que se possa ter um entendimento sobre como e porque ela ocorre, e, dessa forma, poder associar o desenvolvimento com a conservação do solo.

Diante do exposto, o presente estudo se propõe a caracterizar a erodibilidade, o estado ambiental, a morfometria e a susceptibilidade à erosão do solo da bacia do riacho São José na região do Cariri cearense, buscando encontrar associação entre essas categorias.

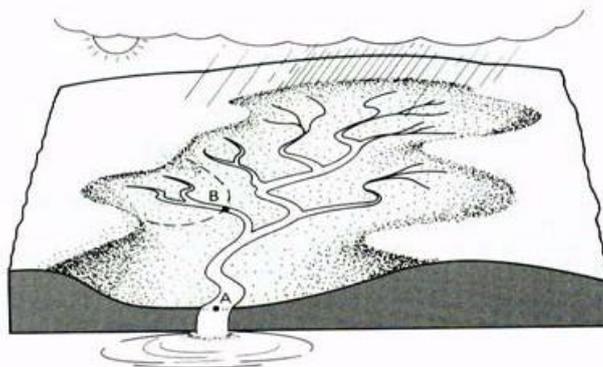
## 2. REVISAO DE LITERATURA

### 2.1. Bacias hidrográficas

A bacia hidrográfica é definida como uma área de captação natural da água da precipitação que faz convergir os escoamentos para um único ponto de saída, seu exutório. É composta basicamente de um conjunto de superfícies vertentes e de uma rede de drenagem formada por cursos d'água que confluem até resultar um leito único no exutório (SILVEIRA, 2001).

Os divisores de água são as cristas das elevações do terreno que separam a drenagem da precipitação entre duas bacias adjacentes (NAGHETTINI, 2006). Os limites da área que compreende a bacia hidrográfica são definidos topograficamente como os pontos que limitam as vertentes que convergem para uma mesma bacia ou exutório.

A área é um dado fundamental para definir a potencialidade hídrica de uma bacia, uma vez que esta é a região de captação da água da chuva. Assim, a área da bacia multiplicada pela lâmina precipitada ao longo de um intervalo de tempo define o volume de água recebido ao longo deste intervalo. A área pode ser estimada a partir da delimitação dos divisores da bacia em um mapa topográfico.



**Figura 1** – Área de contribuição de uma bacia hidrográfica

Segundo Tucci (1993) a bacia hidrográfica é o elemento fundamental de análise do ciclo hidrológico, principalmente na sua fase terrestre que engloba a infiltração e o escoamento superficial. Neste contexto a bacia é considerada um sistema físico onde a entrada é o volume de água precipitado e a saída é o volume de água escoado pelo exutório, levando em consideração perdas intermediárias, como os volumes evaporados e transpirados e também os infiltrados profundamente.

A hidrografia de uma bacia reflete a estrutura geológica, litológica e tectônica, a evolução morfogenética regional, o clima e as intervenções antrópicas. O uso das terras é a principal atividade humana que afeta a hidrografia, mas outras atividades, como a transposição de bacias, também podem causar consideráveis alterações (SNADDON et al., 1998; LATRUBESSE et al., 2005). Assim, observa-se que os ecossistemas de uma bacia hidrográfica são dinâmicos, alterando-se continuamente sob os impactos das interferências antrópicas na vegetação, nos solos e nos recursos hídricos.

As características climáticas, o tipo de solo, a geologia, a geomorfologia, a cobertura vegetal, o tipo de ocupação, os regimes pluviométrico e fluviométrico e a disponibilidade hídrica são de extrema importância para realização de monitoramento e planejamento mais eficiente dos recursos naturais de uma bacia.

O clássico conceito de bacia hidrográfica é ainda ampliado pelo ponto de vista do planejador, direcionado à conservação dos recursos hídricos, passando a englobar os aspectos hidrológicos, biofísicos, as modificações nos padrões de uso da terra e suas implicações ambientais (PIRES et al., 2002).

Neste contexto, Guerra e Cunha (1996) consideram as bacias hidrográficas como excelentes unidades de gestão dos elementos naturais e sociais, pois, nessa óptica, é possível acompanhar as mudanças introduzidas pelo homem e as respectivas respostas da natureza. Assim, torna-se essencial a implantação de ações de monitoramento, pesquisa e gerenciamento (CALIJUR; BUBEL, 2006), conduzindo a bacia hidrográfica como célula básica de análise ambiental, permitindo conhecer e avaliar os diversos componentes, processos e interações (BOTELHO; SILVA, 2004).

Segundo Lima e Zakia (2006) a manutenção da vazão, quantidade e qualidade da água de uma bacia hidrográfica dependem de mecanismos naturais de controle, desenvolvidos ao longo da evolução da paisagem. Um destes mecanismos é a relação entre a vegetação e a água, na escala de bacia hidrográfica.

## **2.2. Erosão do solo**

O problema da erosão dos solos tem sido uma preocupação mundial, pois além de gerar queda na produtividade agrícola, compromete também a qualidade dos rios acentuando processos de assoreamento e enchentes, afetando principalmente a população de baixa renda de países subdesenvolvidos.

Erosão é um fenômeno que ocorre constantemente na natureza, desgastando a superfície terrestre, eliminando camadas superficiais de solo e modelando a paisagem por processos físicos, químicos e biológicos de remoção (SUGUIO, 2003; BIGARELLA, 2003). A erosão é considerada um processo natural no desenvolvimento da paisagem quando a remoção do material de superfície por meio do vento, gelo ou água não sofre interferências de ações antrópicas (CUNHA, 1997 apud VITTE; VILELA FILHO, 2006). Por outro lado, quando a erosão é acelerada, ocorrendo em intensidade superior à erosão natural, é atribuída, usualmente, ao resultado das atividades humanas sob determinadas condições de clima, vegetação, solos e relevo. A proteção do solo por cobertura vegetal e o emprego de atividades que não ultrapassem os limites físicos ambientais de determinado sistema são fatores imprescindíveis para que o processo erosivo ocorra de forma equilibrada.

O processo erosivo promovido pelas águas pluviais em superfície, que tem início com a erosão laminar, pode prosseguir na forma de sulcos, ravinas e voçorocas, causando problemas à cobertura pedológica, o que torna, às vezes, impossível utilização agrícola. Conseqüentemente, a deposição dos sedimentos nas baixadas e nos corpos d'água produz grandes prejuízos ao meio ambiente, em nível local ou em grandes áreas como, por exemplo, o assoreamento de rios e reservatórios. Além disso, as partículas transportadas pela água, em áreas agrícolas, podem conter defensivos agrícolas e contaminar corpos d'água superficiais (TEIXEIRA GUERRA; CUNHA 2007).

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). O planejamento do uso das terras é uma etapa essencial para a minimização dos impactos causados pela erosão do solo. A tendência atual é que as informações necessárias para a avaliação das terras sejam compatíveis com técnicas de geoprocessamento e tratadas de forma mais objetiva (DIEPEN et al., 1991).

Um dos principais tipos de erosão é decorrente do impacto das gotas e do escoamento da água da chuva. O fluxo superficial da água da chuva, de acordo com o escoamento, produz formas de erosão diferenciadas, como a erosão laminar que consiste na remoção aparentemente uniforme da camada superior do solo e a erosão linear que se caracteriza na remoção de sedimentos pelo fluxo concentrado da água superficial ou de sub-superfície.

Segundo Resende (1995), a erosão dos solos aumenta as pedoformas côncavas para as convexas, passando pela linear que apresenta maior estabilidade. Para esse mesmo autor, as formas côncavas apresentam ineficiente remoção de sedimento, principalmente na base de suas encostas, sendo forma de maior convergência de água; enquanto que a forma convexa apresenta maior divergência. A quantificação da erosão associada às formas de paisagem tem apresentado subsídios para a determinação de zonas específicas de manejo. Tais informações poderão ser transferidas para formas de paisagens semelhantes.

Entre as perspectivas de estudo da erosão do solo que levam em consideração a análise espacial do fenômeno, está a avaliação preditiva como forma de subsidiar o planejamento do uso da terra, bem como definir as medidas de conservação.

### 2.2.1. Erosão hídrica

A deterioração dos solos é um dos principais problemas ambientais do planeta, sendo a erosão hídrica a forma mais prejudicial de degradação (COGO 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 prejuízo econômico enorme 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. Isso implica que a ação erosiva da precipitação é muito maior quando o solo está descoberto, quando a cobertura do solo atingir níveis próximos a 80%, as perdas de solo são insignificantes.

Conforme Oliveira et al. (2010) a cada ano são perdidos, em todo o território brasileiro, milhões de toneladas de solo agrícola devido à erosão. O que se nota principalmente na zona rural, é que as perdas por erosão continuam sendo elevadas, haja vista que a maioria dos agricultores ainda não utiliza técnicas de manejo nem de conservação adequadas ao solo.

De acordo com Bertoni e Lombardi Neto (1990), a chuva é um dos fatores de maior importância para a erosão, sendo que a intensidade, a duração e a frequência são as propriedades mais importantes que afetam o processo erosivo. A frequência das chuvas influenciará nas perdas de solo, mesmo com chuvas de menor intensidade. Caso os intervalos entre uma chuva e outra sejam curtos, o solo manterá um alto teor de umidade, favorecendo o escoamento superficial e o transporte de sedimentos.

Llopis Trillo (1999) define a erosão hídrica como aquela em que os processos de desagregação das rochas ou solos, e de desnudação e transportes, são efetuados pela chuva. A erosão do solo causada pela água é um processo complexo e depende da intensidade e da quantidade da chuva, das características do relevo (comprimento, forma e declividade das vertentes), da cobertura vegetal e da natureza dos solos.

O escoamento superficial das águas da chuva é um agente ativo para o desenvolvimento do processo de erosão. A partir do escoamento ocorre o transporte seletivo de partículas que apresentam menor resistência a energia hidráulica. Neste contexto, o escoamento torna-se um agente potencial somente quando seu poder de erosão excede a resistência do solo, isto é, quando a energia da água for superior a capacidade de coesão das partículas dos solos (BIGARELLA, 2003).

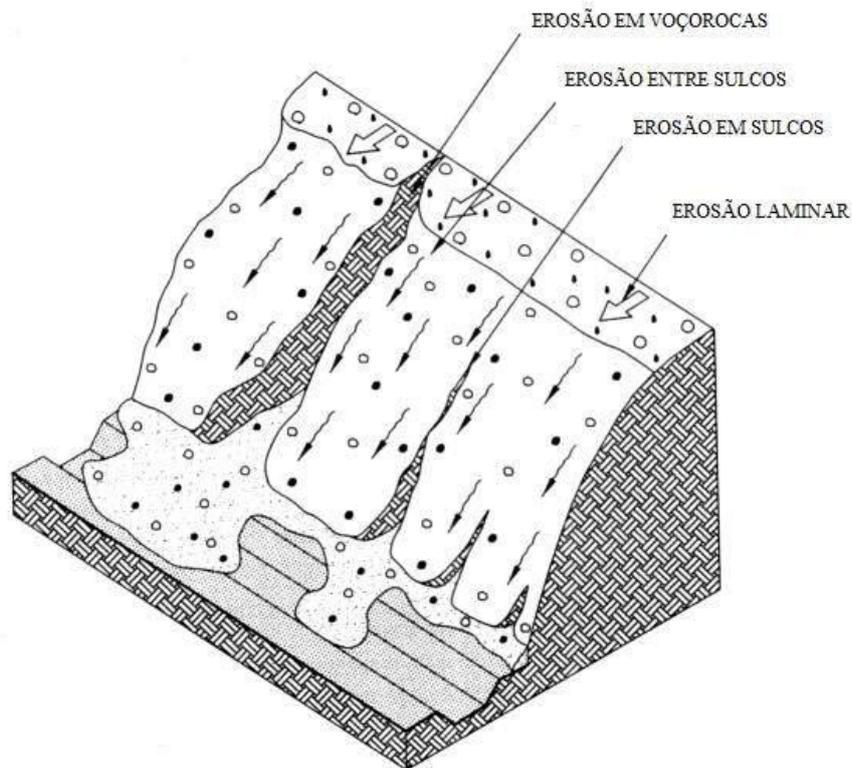
A erosão causada pela água pode ser das formas laminar ou difusa, constituindo processo erosivo por escoamento ou por concentração de fluxo de água (sulcos, ravinas e voçorocas), envolvendo mecanismos e condições diversos.

Guerra e Cunha (1995) relatam que a erosão em voçoroca representa uma forma de erosão mais complexa e destrutiva no quadro da erosão linear. Correspondem ao produto da ação combinada das águas do escoamento superficial e subterrâneo, sendo de grande porte e de formas variadas. As voçorocas são características erosivas relativamente permanentes nas encostas, possuindo paredes laterais íngrimes e, em geral, fundo chato, ocorrendo fluxo de água no seu interior durante os eventos chuvosos.

A erosão por voçoroca é uma das principais conseqüências da degradação ambiental, principalmente física dos solos, sejam eles agricultáveis ou mesmo em áreas urbanas. Quando esta feição erosiva deflagra em áreas urbanas, as conseqüências dos processos dela decorrentes são muito maiores, tendo em vista a dimensão das áreas, que são bem menores que as rurais, e a pressão populacional. Geralmente como a densidade demográfica e uso e ocupação do solo urbano são bem maiores, há dificuldades no processo de reabilitação dessas áreas degradadas.

Os processos primários da erosão entre sulcos são a desagregação pelo impacto das gotas de chuva e o transporte pelo fluxo laminar raso. A resistência do solo a tais processos depende da resposta do solo ao impacto, do tipo de fluxo se é laminar ou não, das mudanças na infiltração, da rugosidade e da resistência ao início de movimento e transporte das partículas (ALBUQUERQUE et al., 2002; KUH; BRYAN, 2004).

Quanto maior a turbulência do fluxo de água, maior a capacidade erosiva gerada por esse fluxo. O escoamento em lençol torna-se um processo erosivo efetivo, especialmente quando o lençol de água cobre grandes porções das encostas, em contraste com as pequenas áreas atingidas pelas ravinas.



**Figura 2** - Esquema do processo de erosão hídrica  
(LLOPIS TRILLO, 1999)

Segundo Nearing et al. (2001), a separação do processo de erosão em entressulcos e em sulcos pode ajudar a identificar fontes potenciais de sedimentos contaminados. Isso, segundo os mesmos, é extremamente importante no estudo da distribuição de produtos químicos nas áreas agrícolas, especialmente daqueles que são fortemente adsorvidos pelas partículas do solo. Os sedimentos das áreas entressulcos podem carrear altas concentrações de contaminantes, quando produtos químicos são aplicados em superfície. Em contraste, os sedimentos dos sulcos podem conter mais contaminantes quando os produtos químicos são aplicados de forma localizada e concentrados.

A erosão laminar é aquela que se caracteriza pela separação e arrastamento das partículas superficiais do solo. Esse tipo de erosão se dá em camadas finas e uniformes (BERTONI; LOMBARDI NETO, 1990) e com distribuição do escoamento superficial pelas encostas de forma dispersa, não se concentrando em canais. O lençol de água que cobre a superfície do solo durante uma tempestade raramente se apresenta com profundidade uniforme e, em geral, ocorre como sendo rede sem canais definidos que se bifurcam e recombina em vários pontos (GUERRA, 1995). Esta forma de erosão geralmente ocorre sob condições de chuva prolongada, quando a capacidade de infiltração de água no solo for excedida e as suas depressões e irregularidades forem totalmente preenchidas.

### 2.2.2. Agentes erosivos

Agentes erosivos são elementos que causam ou afetam diretamente a erosão, podendo ser ativos e passivos.

A erosão é causada por forças ativas, como as provenientes da chuva, pois, a água pluvial exerce ação erosiva sobre o solo pelo impacto das gotas, que caem com velocidade e energia variáveis e pelo escoamento da enxurrada, a qual tem velocidade e volume variando em função da declividade, do comprimento da rampa e da capacidade que tem o solo de absorver água; e por forças passivas, como a resistência que exerce o solo à ação erosiva da água (determinada pelas características ou propriedades físicas e químicas) e a densidade da cobertura vegetal (BERTONI; LOMBARDI NETO, 1990). Os agentes ativos são compostos pela água, temperatura, insolação, vento, ação de microorganismos e ação antrópica.

## **Agentes ativos**

### *Água*

A erosão hídrica tem a chuva como principal agente erosivo, manifestando sua ação em duas frentes: pela ação da gota e pelo escoamento superficial. Ambos atuam na desagregação e transporte das partículas. De acordo com Mota (1997), chuvas de grande intensidade e curta duração resultam em maior escoamento das águas e, conseqüentemente, em maior possibilidade de ocorrer a erosão. Quanto maior for a freqüência das chuvas, mais encharcado ficará o solo, reduzindo sua capacidade de absorver água e, portanto mais água escoará arrastando partículas.

### *Temperatura*

A temperatura e a insolação são outros efeitos climáticos de grande importância na erosão. A temperatura é muito influenciada pela insolação e ambas provocam dilatações e contrações sucessivas que enfraquecem o solo, facilitando a remoção de partículas.

### *Vento*

O vento é responsável por transporte de material já desagregado e tem grande importância nos terrenos planos, onde não se processa escoamento, nas regiões áridas, semiáridas e nas superfícies desérticas, onde a vegetação não protege o solo adequadamente.

### *Ação de microorganismos*

Segundo Thornes (1990), estudos realizados em microescala tem contribuído com entendimento da ação dos microorganismos no intemperismo de rochas e minerais. Algumas espécies de líquens, algas, fungos e bactérias são capazes de intemperizar rochas comuns através de processos químicos e/ou físicos. Microorganismos também podem proteger a superfície de rochas e minerais, retardando a intemperização.

### *Ação antrópica.*

As ações antrópicas são as práticas gerais realizadas pelo homem, e possui uma grande importância no tipo e intensidade dos processos erosivos. Segundo Bandeira (2003), a ação antrópica é toda e qualquer intervenção no meio físico provocada pelo homem. Ela é impulsionada por necessidades originadas do modo de vida e modeladas por aspectos políticos, econômicos, culturais e sociais, os quais caracterizam essas ações. Entre as ações causadas pela ação antrópica destacam-se: desmatamento, construção de estradas, criação/expansão de vilas e cidades, execução inadequada de cortes e aterros e execução deficiente do sistema de drenagem.

### **Agentes Passivos**

Considera como forças passivas na erosão, topografia, gravidade, tipo de solo, cobertura vegetal e formações superficiais.

### *Topografia*

O relevo se constitui em elemento de significativa importância quando se estuda a erosão hídrica, uma vez que é potencializador do processo. As características do terreno que exercem importância sobre a erosão são a declividade (grau do declive), o comprimento da vertente e a geometria (concavidade, convexidade e retilinearidade) (STOCKING, 1972 apud LIMA, 2003).

A declividade é um importante fator na erosão dos solos, exercendo influência sobre o volume e a velocidade da enxurrada. O comprimento da encosta é outro importante aspecto do terreno que exerce influência sobre o fenômeno erosivo. O aumento do comprimento leva a um aumento no volume e na velocidade da enxurrada e, conseqüentemente, em maior poder erosivo.

### *Gravidade*

A gravidade é outro agente de grande importância na ação erosiva. Devido ao campo gravitacional terrestre, nos terrenos de maior declividade ocorre aumento da velocidade das águas vindas de chuvas, incrementando o processo erosivo.

### *Tipo de solo*

As características físicas, químicas, mineralógicas e biológicas dos solos lhes proporcionam comportamentos diferentes diante dos agentes erosivos. Esse comportamento é traduzido pela susceptibilidade do solo à erosão, que indica a sua maior ou menor resistência a esse fenômeno. Lal (1990) considera que a susceptibilidade do solo à erosão é influenciada pelas propriedades físicas/hidrológicas, químicas/mineralógicas e biológicas/bioquímicas. Com relação à textura do solo, algumas frações granulométricas são removidas mais facilmente do que outras. A Tabela 1 apresenta a maior e menor susceptibilidade à erosão de acordo com o tipo de solo segundo LOPPIS TRILHO (1999).

**Tabela 1** - Susceptibilidade à erosão de acordo com o tipo de solo (LOPPIS TRILHO, 1999)

SÍMBOLO	DESCRIÇÃO DO SOLO	ERODIBILIDADE
GW	Pedregulho e mistura de pedregulho e areia, bem graduados, com poucos ou sem finos	Menos erodível ↓ Mais erodível
GP	Pedregulhos e mistura de pedregulho e areia, mal graduados, com poucos ou sem finos	
SW	Areias e areias pedregulhosas, bem graduadas, com poucos ou sem finos	
GM	Cascalho siltooso, misturas de cascalho, areia e silte	
CH	Argilas inorgânicas de plasticidade elevada, argilas gordas	
CL	Argilas inorgânicas de plasticidade baixa ou média, argilas pedregulhosas, argilas arenosas, argilas siltoosas, argilas magras	
OL	Siltes orgânicos, siltes e argilas orgânicas de plasticidade baixa	
MH	Siltes inorgânicos, solos arenosos finos ou siltoosos micáceos e diatomáceos, solos elásticos	
SC	Areias argilosas,	
SM	Areias siltoosas	
ML	Siltes inorgânicos e areias muito finas, pó-de-pedra, areias finas siltoosas ou argilosas, e siltes argilosos pouco plástico.	

### *Cobertura vegetal*

A cobertura vegetal protege o solo contra a erosão pluvial, aumentando a evapotranspiração e a infiltração, diminuindo o escoamento superficial. Parte da água da chuva não chega ao solo, sendo interceptada pela folhagem evaporando diretamente, outra parte escoia pelos ramos e troncos lentamente, indo ao solo para se infiltrar. Segundo Branco e Rocha (1987), a vegetação protege o solo de diferentes maneiras: reduzindo ou amortecendo o impacto das gotas de chuva contra o solo e diminuindo a velocidade do escoamento superficial da água (constituindo barreira física ao transporte de sedimentos), de tal maneira que, quando a velocidade é reduzida à metade, o transporte cai à quarta parte de seu valor; aumentando a aderência dos grãos dos solos, dando maior solidez à estrutura e aumentando a porosidade, devido a presença de um sistema radicular constituído de uma infinidade de filamentos microscópicos aderentes aos grãos.

### **2.3. Variabilidade espacial de fatores de erosão**

A estrutura ou a organização espacial de diferentes unidades de paisagens tem um impacto relevante na erosão. Entretanto, os modelos atuais de erosão enfatizam muito o aspecto da variabilidade temporal e destacam poucos os estudos que consideram a variabilidade espacial das propriedades do solo ligadas à erosão (OOST et al., 2000). No entanto, a variabilidade de alguns atributos das paisagens é de grande importância no entendimento das formas de erosão. Assim, a influência da variabilidade da paisagem não é estudada em detalhes. Alguns trabalhos têm demonstrado que a variabilidade da erosão está diretamente relacionada com a variabilidade das propriedades do solo e que estas variam com a forma da paisagem (CUNHA; POCAI, 2000).

A erodibilidade do solo e outros fatores de erosão apresentam grande variabilidade espacial e temporal, explicada pela diversidade climática, a qual influi no potencial erosivo das chuvas e pela variabilidade do solo, tendo influência na susceptibilidade à erosão (BERTOL et al., 2002). Conforme Wang et al. (2002) a geoestatística é importante ferramenta para o estudo dos processos de erosão, porém, poucos trabalhos têm explorado o estudo da variabilidade espacial de fatores de erosão.

Nesse sentido, deve ser feita análise dos fatores condicionantes da erodibilidade, no sentido de identificar aqueles que exercem maior importância no processo. Dois aspectos podem ser levados em consideração, ambos contemplando a abrangência espacial do fenômeno. Um dos aspectos é cartografar as marcas deixadas pelos processos erosivos, sejam elas a presença de solos decaptados, ravinas ou voçorocas, a exemplo de que foi feito por Stein et al. (1987) apud Lima (2003), para o caso da erosão laminar na bacia do Peixe-Paranapanema (SP), a partir do mapeamento das cicatrizes de erosão por unidade de área. Com isso, procurou-se avaliar o estado da erosão no momento do estudo e correlacionar este aspecto com o uso da terra e o potencial natural à erosão da área. Pinto (1991) também fez mapeamento das feições erosivas para avaliar a relação existente entre a ocorrência do processo erosivo e as áreas potencialmente

críticas. Bandeira (2003) analisando o potencial de risco a erosão e deslizamentos de encostas ocupadas em zona urbana apresentou o mapa de risco desses processos para o município de Camaragibe (PE).

O solo, quando cultivado, recebe fontes adicionais de heterogeneidade, originadas exclusivamente do efeito antrópico da agricultura (BECKETT; WEBSTER, 1971). O estudo da variabilidade espacial dos atributos do solo é particularmente importante em áreas onde ele está submetido a diferentes manejos, podendo indicar alternativas, não só para reduzir os efeitos da variabilidade sobre a produção das culturas, como também, para aumentar a possibilidade de se estimar respostas em função de determinadas práticas de manejo (OVALLES; REY, 1994).

#### **2.4 Equação Universal da Perda de Solo (USLE)**

Na análise espacial dos processos de erosão hídrica são utilizados modelos preditivos como forma de subsidiar o planejamento ambiental. Técnicas de modelagem da erosão proporcionam a avaliação dos impactos na agricultura, solos e recursos hídricos (RENSCHLER; HARBOR, 2002), fornecendo informações úteis na tomada de decisões no planejamento conservacionista do solo e da água (SCHIETTECATTE et al., 2008).

A Equação Universal da Perda de Solo é a equação mais usada em estudos de predição de perdas de solos, principalmente pela facilidade de obtenção dos dados e baixo custo (WISCHMEIER; SMITH, 1978). No geral os modelos empíricos são os mais usados nos planejamentos conservacionistas e permitem estabelecer critérios do meio físico que orientem o controle do uso da terra.

A USLE foi desenvolvida nos Estados Unidos na década de 1950, sendo revisada e atualizada por Wischmeier et al. (1971). No Brasil, os trabalhos com essa equação se iniciaram com Bertoni et al. (1975) no Estado de São Paulo. A USLE é constituída por dois conjuntos de fatores (naturais e antrópicos), que multiplicados entre si, resultam numa perda média anual de solos, por unidade de área (Equação 1).

$$\varepsilon = R.K.L.S.C.P \dots\dots\dots (1)$$

Em que:

$\varepsilon$  = massa de solo erodida por unidade de área ( $t \text{ ha}^{-1}$ )

R = fator de erosividade - índice de erosão pela chuva ( $\text{MJ ha}^{-1} \text{ mm h}^{-1}$ );

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

L = fator de comprimento de rampa (adimensional)

S = fator de declividade do solo (adimensional);

C = fator de uso e manejo do solo, cobertura vegetal (adimensional);

P = fator de práticas conservacionistas (adimensional)

O estudo da erosão dos solos se torna importante, pois o conhecimento antecipado do potencial de erosão de um solo em área pré-estabelecida pode direcionar a atividade humana no sentido de um uso e manejo sustentável dos recursos naturais ali contidos (AQUINO et al., 2007).

## 2.5. Erodibilidade do solo (K)

A susceptibilidade à erosão diz respeito à probabilidade de ocorrência de um evento em uma determinada área, ou seja, ao desgaste que a superfície de um solo poderá sofrer quando submetida a qualquer uso, sem medidas conservacionistas. Trata-se de um parâmetro importante no planejamento do uso da terra e depende principalmente da capacidade de infiltração da água no solo e da resistência ao desprendimento e transporte de partículas sólidas do solo pelo escoamento superficial (XAVIER, 2007).

O fator erodibilidade do solo é representado pela relação entre a perda de solo e a erosividade da chuva, quando tais dados são obtidos individualmente para cada chuva. Essas quantificações são efetuadas nas condições de parcela padrão, que é a unidade fundamental de pesquisa de erosão, preconizada pela equação universal de perda de solo (WISCHMEIER; SMITH, 1965 apud MANNIGEL et al. 2002). Por outro lado, tolerância de perda representa a quantidade de solo que pode ser perdida pela erosão acelerada, expressa em unidade de massa por unidade de área no tempo, que mantém os

seus níveis iniciais de fertilidade e com a equivalente produtividade, por longo período de tempo.

A erodibilidade do solo traduz-se pelas condições de reação do solo aos processos erosivos de natureza hidrológica. Estes processos consistem no destacamento das partículas do solo e seu transporte, pelo impacto das gotas da chuva e escoamento superficial, seguido de deposição localizada devido à rugosidade do terreno, acompanhando outros processos de interação água-solo dos quais a infiltração e o fluxo da água no perfil desempenham um papel igualmente relevante.

A resistência do solo à erosão depende de fatores extrínsecos e intrínsecos ao solo. Como fatores intrínsecos ao solo são considerados as propriedades físicas (textura, estrutura, permeabilidade, densidade), químicas, mineralógicas e biológicas do solo. Entre os fatores extrínsecos ao solo, temos o comprimento, a forma e o declive de rampa além do sistema de manejo adotado e o tipo de cobertura do solo.

A textura do solo é um fator importante que influencia a erodibilidade por afetar os processos de desagregação e transporte, uma vez que, enquanto grandes partículas de areia resistem ao transporte, solos de textura fina (argilosos) também resistem à desagregação, sendo a areia fina e o silte as texturas mais suscetíveis à desagregação e ao transporte. Assim, solos derivados de materiais originados de transporte eólico, por exemplo, são muito susceptíveis à erosão (LAL, 1988 apud VITTE, 2007).

Propriedades estruturais também interferem na interação com a chuva (solo-chuva) e, conseqüentemente, na capacidade de infiltração. A taxa de equilíbrio de infiltração é uma função da porosidade total, a proporção relativa de macroporos, e a estabilidade e continuidade de macroporos, além do que, os biocanais criados por raízes deterioradas e pela fauna do solo têm maiores efeitos na capacidade de infiltração (VITTE, 2007).

A matéria orgânica modifica a estrutura do solo, propiciando melhores condições de arejamento e de retenção de água. Nos solos arenosos, promove a aglutinação de partículas, firmando a estrutura e diminuindo o diâmetro dos poros, aumentando, assim,

a capacidade de retenção de água e diminuindo a susceptibilidade deste solo à erosão. Os óxidos de ferro e de alumínio são considerados agentes indicadores de propriedades (permeabilidade e coesão do solo) que influenciam a erodibilidade dos solos, pois funcionam como agentes flocculantes, diminuindo a coesão entre as partículas e, conseqüentemente, modificando a estrutura e a permeabilidade do solo.

A determinação do índice de erodibilidade com recurso a um nomograma ou equação aproxima-se dos valores medidos experimentalmente se os solos apresentarem características semelhantes. Estimativas menos precisas são obtidas quando é necessário extrapolar os valores do nomograma, ou seja, nos casos em que a percentagem de matéria orgânica seja superior a 4%, ou de solos com argilas expansíveis ou aqueles em que, a resistência à erosão é função da estabilidade dos agregados em vez do tamanho das partículas primárias.

A erodibilidade do solo tem sido consagrada em modelos de erosão pelo parâmetro K estando o seu valor determinado para muitos solos agrícolas nos Estados Unidos (WISCHMEIER; SMITH, 1978).

As equações que permitem estimar a erodibilidade são desenvolvidas, geralmente, por meio de regressões múltiplas entre valores medidos no campo e os atributos do solo, quando apresentam boa correlação, podendo, assim, fornecer o fator de erodibilidade do solo para uso na Equação Universal da Perda de Solo (USLE). Quando espacializada, por meio de Sistema de Informações Geográficas, permite uma análise da perda de solo por erosão laminar, possibilitando contextualizar os resultados obtidos em função do uso e ocupação das terras.

Alguns solos são mais facilmente erodidos que outros, mesmo quando o declive, a precipitação, a cobertura vegetal e as práticas de controle de erosão forem as mesmas. Essa diferença, devida às propriedades inerentes ao solo, é referida como erodibilidade do solo (BERTONI; LOMBARDI NETO, 1999).

As vantagens da utilização deste método são a rapidez na determinação da erodibilidade dos solos, em comparação com métodos diretos convencionais, e a possibilidade de sua estimativa através de parâmetros obtidos por análises laboratoriais de fácil execução.

## **2.6. Avaliação do índice de erodibilidade do solo e identificação de impactos ambientais**

A degradação dos recursos naturais, principalmente aquela provocada pelo uso intensivo e, às vezes, abusivo do solo vem crescendo assustadoramente. Áreas bastante críticas são reflexos da deterioração gradativa do ambiente, o que pode ser constatado pela proliferação de áreas de riscos de erosão do solo.

Cunha (1991) observou que a ocupação humana representa o fator decisivo na aceleração dos processos erosivos. O resultado das atividades antrópicas inadequadas na exploração dos recursos naturais renováveis, ao longo dos anos, ocasionou a perda da biodiversidade e a diminuição das áreas produtivas através de usos como agricultura e pastagem. A urbanização desordenada tem acelerado ainda mais o processo de degradação ambiental (DIAS, 1999).

O Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA, considerando a necessidade de se estabelecer definições, responsabilidades, critérios básicos e diretrizes gerais para uso e implementação da Avaliação de Impacto Ambiental como um dos instrumentos da Política Nacional do Meio Ambiente, estabelece, através do Art. 1º da Resolução CONAMA 001/86:

Considera-se impacto ambiental qualquer alteração das propriedades físicas, químicas e biológicas do meio ambiente, causada por qualquer forma de matéria ou energia resultante das atividades humanas que, direta ou indiretamente, afetam:

I - a saúde, a segurança e o bem-estar da população;

II - as atividades sociais e econômicas;

III - a biota;

IV - as condições estéticas e sanitárias do meio ambiente;

V - a qualidade dos recursos ambientais. (CONAMA, 1986).

A análise de um impacto ambiental tem sido definida como o processo de reconhecimento de causas e efeitos, sendo a causa, qualquer ação do projeto que tenha efeito sobre o meio ambiente; e os efeitos, os impactos ambientais desta ação (SHOPLEY; FUGGLE, 1984).

A caracterização de ações que causam impacto no meio deve atender aos requisitos de: ter significância (capacidade de gerar alterações), ser independente (para evitar duplicidade), estar relacionada ao projeto e, na medida do possível, ser quantificada (FDEZ-VÍTORA, 1997).

A intensidade com que os solos realizam cada uma das suas funções é extremamente importante para a sua sustentabilidade. A degradação do solo reduz a sua disponibilidade e viabilidade a longo prazo, reduzindo ou alterando a sua capacidade para desempenhar funções a ele associadas. A perda de capacidade do solo para realizar as suas funções, deixando de ser capaz de manter ou sustentar a vegetação, é designada por desertificação.

## **2.7. Análise morfométrica e geomorfologia de bacias hidrográficas**

A caracterização morfométrica de uma bacia hidrográfica é um dos primeiros e mais comuns procedimentos executados em análises hidrológicas ou ambientais, e tem como objetivo esclarecer as várias questões relacionadas com o entendimento da dinâmica ambiental local e regional.

O comportamento hidrológico de uma bacia hidrográfica é função de suas características geomorfológicas (forma, relevo, área, geologia, rede de drenagem, solo, dentre outros) e do tipo da cobertura vegetal (LIMA, 1986). Os estudos morfométricos de formas de relevo e da rede de drenagem são instrumentos básicos para o desenvolvimento de planos de gestão que visem a utilização racional do meio ambiente e a compreensão dos processos naturais atuantes neste meio.

As diferentes formas de relevo presentes na superfície terrestre são oriundas da interação entre processos tectônicos, pedogenéticos e intempéricos, que atuam de forma

diversificada nos diferentes materiais rochosos. Para se obter dados quantitativos que diferenciem áreas homogêneas dentro de uma bacia hidrográfica utilizam-se o método da análise morfométrica, que consiste na caracterização de parâmetros morfológicos, tais como: densidade de drenagem, gradiente de canais, índice de sinuosidade, entre outros. Tais parâmetros explicitam os indicadores físicos da bacia, caracterizando suas homogeneidades (LANA, 2001).

Tonello et al. (2006) realizaram um trabalho sobre a “análise hidroambiental da bacia hidrográfica da Cachoeira das Pombas, Guanhães, MG”, localizada numa área de propriedade de uma empresa de extração e beneficiamento de celulose. Neste trabalho ele trás informações importantes sobre o uso de parâmetros morfométricos associados à dinâmica ambiental. Informações sobre alguns parâmetros morfométricos (área de drenagem, perímetro, coeficiente de compacidade, fator de forma, índice de circularidade, dentre outros), associados a caracterização das nascentes (tipo, sazonalidade de fluxo, estado de conservação e avaliação do estado de conservação hídrico e ambiental), forneceram informações importantes sobre o manejo integrado dos recursos naturais na área.

Enfim, a caracterização morfométrica de bacias é de grande importância para estudos ambientais, principalmente quando o ambiente em questão está sofrendo alterações em parte de seus cursos d'água, pois estes cursos desempenham papéis importantes dentro do ecossistema.

## **2.8. Análise morfométrica na avaliação de impactos ambientais**

Estudos sobre a aplicabilidade dos índices e características morfométricas tem trazido informações relevantes na relação solo superfície. Esses estudos abordam pedologia, relevo e rede hidrográfica, com os conseqüentes processos ambientais, e descrevem a dinâmica das drenagens superficiais e as formas topográficas analisando diversas questões geomorfológicas.

Desta forma, a análise tem sido realizada para retratar as condições do ambiente (PISSARRA et al., 2004) e formular novas abordagens que apontem alternativas para a

intervenção do homem na paisagem (CHRISTOFOLETTI, 1974). Tonello et al. (2006) destacam o uso da morfometria em estudos das interações ambientais do ponto de vista quantitativo, por meio de vários parâmetros, sendo que estes podem revelar indicadores físicos específicos para determinado local, de forma a qualificarem as alterações ambientais.

Cunha et al. (2007) realizaram a análise morfométrica da microbacia do Córrego Limo na Área de Proteção Ambiental (APA) do rio Uberaba e observaram que o comprimento da rede de drenagem principal é de 4,45 km. A bacia possui um formato circular, tem rede de drenagem do tipo dendrítico, sinuosidade e declividade baixas, sendo uma área propensa a enchentes, porém o coeficiente de rugosidade revela que a microbacia possui aptidão para agricultura. Gobbi et al. (2008), em estudo semelhante na mesma região, observaram que a microbacia do Córrego Melo tem formato alongado, que a área apresenta baixo risco de ocorrência de enchentes. Pelos índices de declividade da bacia serem elevados e o relevo, ondulado, os autores destacaram que a área tem aptidão agrícola para florestas e reflorestamentos.

Neste contexto, a análise morfométrica quando aplicada em estudos de bacias hidrográficas possibilita a realização de uma análise quantitativa e qualitativa, usando os valores de um conjunto de parâmetros para obter as características principais de uma área (CARDOSO, 2002). Vários parâmetros podem ser utilizados para subsidiar uma análise mais detalhada, dentre eles estão: a amplitude altimétrica, o coeficiente de compacidade, o fator forma, o índice de circularidade e o índice de forma (ALCANTAR; AMORIM, 2005).

## **2.9 Susceptibilidade à erosão do solo**

Os índices que definem áreas de susceptibilidade à erosão têm sido utilizados no planejamento agrícola e ambiental em diversos países, pois permite a identificação de regiões em situações críticas de perda de solo (ZHANG et al., 2004; BASIC et al., 2005). De acordo com Mati et al. (2000), é necessário mapear mais extensivamente e quantificar a erosão, com o objetivo de subsidiar estratégias e procedimentos para o planejamento e conservação do solo a nível regional. Geralmente os mapas de

erodibilidade são elaborados visando à caracterização de risco de erosão, sendo convencional que se estabeleça as classes de erodibilidade sobre unidades de mapeamento de solos e rochas.

Mattos et al. (2002) e Jimenez-Rueda et al. (2006) utilizaram-se da sistemática morfoestrutural e morfotectônica como critérios para mapeamento de classes de susceptibilidade a erosão de solos. A partir da análise de imagens de satélite, para duas áreas distintas do sudeste brasileiro (Quadrilátero Ferrífero – MG e Vale do Paraíba do Sul - SP), eles determinaram fatores importantes para a definição das classes de erodibilidade e da permeabilidade do solo/rocha, associadas às classes de declividade; nas quais a permeabilidade é função dos vazios que existem entre os componentes minerais e sua matriz nos solos/rochas e das discontinuidades existentes nestes corpos por efeito das deformações tectônicas (densidade de fraturamento).

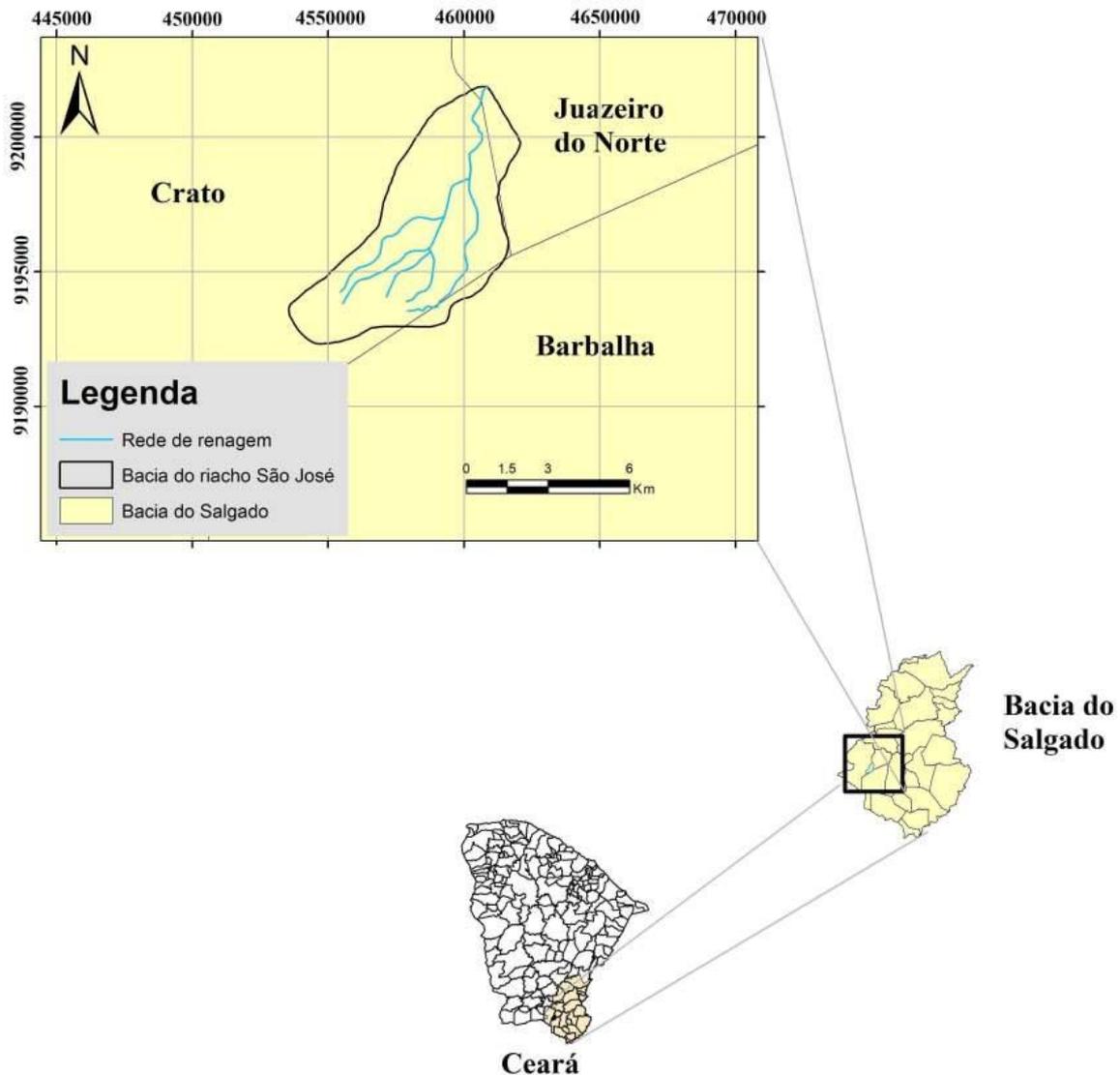
Valério Filho e Araújo Junior (1995) enfatizam que o uso de técnicas de geoprocessamento possibilita a aquisição, manipulação e a integração de dados temáticos servindo de subsídios para a caracterização espacial/temporal de áreas com susceptibilidade a processos erosivos.

Um modo de verificar a adequação do uso da terra é o confronto do uso atual com as classes de capacidade de uso, semelhante aos estudos efetuados por Formaggio et al. (1992) e Silva et al. (1993). O mapa de uso atual tem também no SIG um forte aliado para sua confecção, por meio de composições coloridas de imagens obtidas por sensoriamento remoto. Este método ajuda a identificar diferentes alvos relativos à cobertura e, ou, ao uso do solo, submetendo-se a imagem de satélite a um processo de classificação multiespectral. Segundo Crósta (1992), este processo consiste em atribuir cada pixel a uma categoria de um grupo de classes, podendo ser a classificação supervisionada (interferindo-se na identificação das classes desejadas) ou não supervisionada (totalmente realizada pelo sistema).

### 3 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA

#### 3.1. Localização

A bacia hidrográfica do riacho São José é uma sub-bacia do rio Salgado, localizada na região do Cariri cearense. Ela encontra-se na faixa de conurbação das cidades de Juazeiro do Norte e Crato, uma área em franca expansão imobiliária na Região Metropolitana do Cariri. Considerando o sistema de coordenadas *UTM* (Zona 24S, SAD-69 *datum*), ela localiza-se entre as coordenadas 9.200.000 - 9.150.000 N e 450.000 - 500.000 E, com exutório em 460.808 E e 9.201.849 N e área de aproximadamente 40 km<sup>2</sup> (Figura 3).



**Figura 3** – Localização da bacia hidrográfica do riacho São José

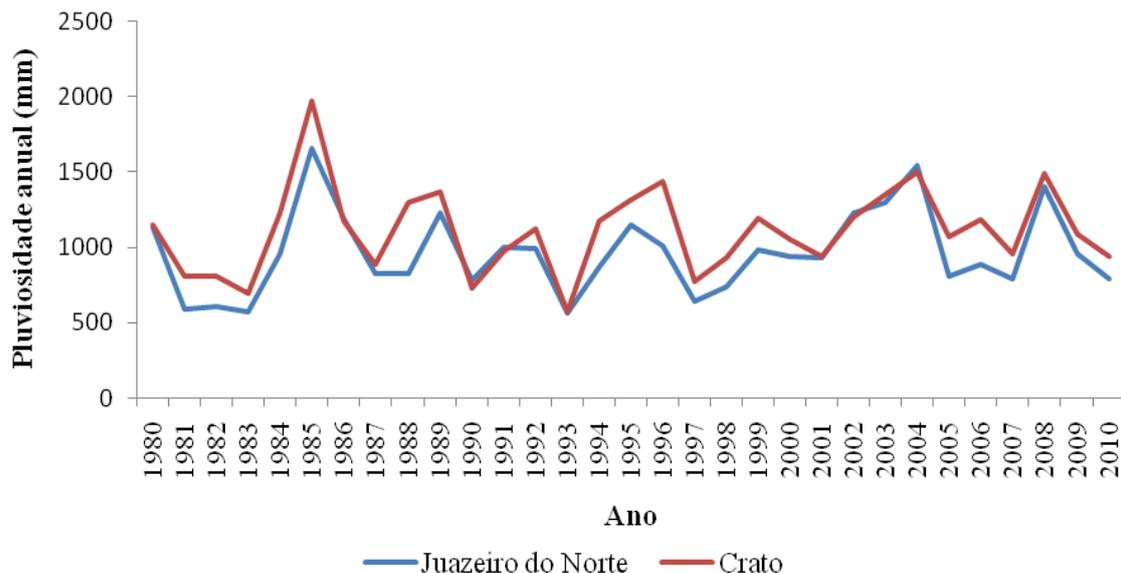
A bacia do riacho São José é caracterizada por um crescimento urbano potencial com ocupação de áreas inadequadas (inclusive as áreas de encosta), habitações precárias e falta de condições sanitárias; e por atividades antrópicas como uso do solo para fins agrícola e de pastagens, com destruição de recursos de valor ecológico (fauna, flora, etc). Estas ações antrópicas aumentam o escoamento superficial e o carreamento de sedimentos para os cursos d'água superficiais, assoreando-os.

A Região Metropolitana do Cariri possui uma importância estratégica para o processo de integração nacional. Ela situa-se em uma área geograficamente central da região nordeste, mantendo-se a uma distância média de 600 km das principais capitais nordestinas. Trata-se de uma região encravada no semiárido nordestino que catalisa o desenvolvimento interiorano dos estados do Ceará, Pernambuco, Piauí e Paraíba, formando um importante pólo comercial, industrial e educacional, centralizado nas principais cidades: Juazeiro do Norte, Crato e Barbalha.

### 3.2. Características climáticas

Segundo o IPECE (2009), o clima no município do Crato é do tipo tropical quente sub-úmido, na encosta da Chapada e tropical quente semiárido brando, na depressão sertaneja, com temperatura média anual em torno de 24°C para os meses mais frios e de 26°C para os meses mais quentes. A precipitação média é de aproximadamente 1.090 mm, com período chuvoso de fevereiro a maio. Para o município de Juazeiro do Norte as características climáticas permanecem semelhantes havendo uma pequena diferença na precipitação média que é de aproximadamente a 925 mm.

Na Figura 4 estão apresentadas as pluviosidades anuais (mm) para os postos meteorológicos de Crato e Juazeiro do Norte no período de 1980 a 2010.

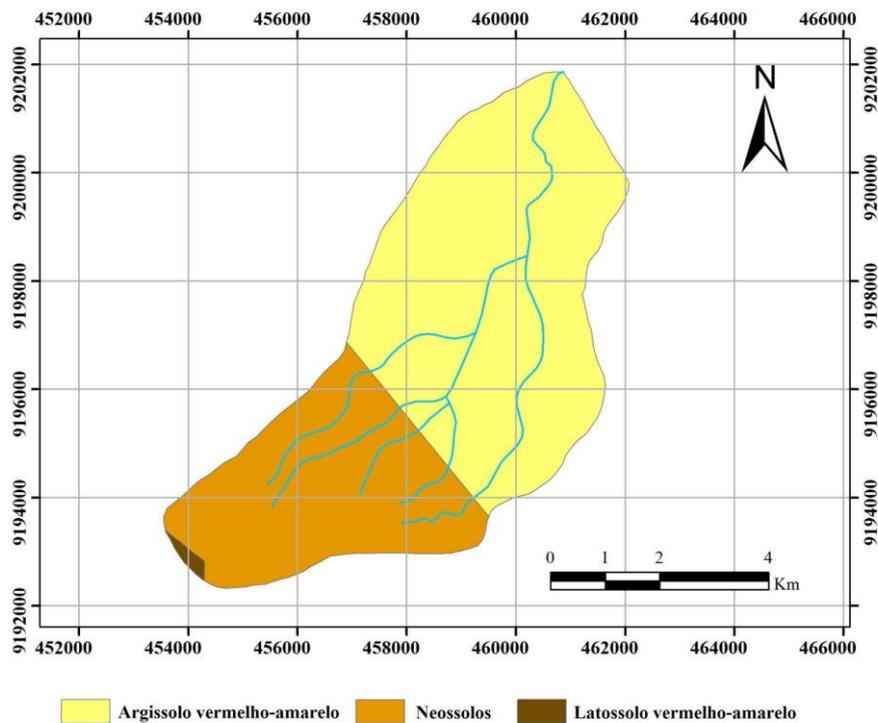


**Figura 4** - Precipitação anual nos municípios de Crato e Juazeiro do Norte (FUNCEME, 2011)

Na área da Chapada do Araripe e Patamares de Entorno, ocorrem chuvas mais abundantes que chega anualmente à média de 1.154,6 mm (FUNCEME, 2006). Nesta área a umidade relativa do ar, na quadra chuvosa, fica em torno de 80% e no período seco, reduz-se para a faixa de 50%.

### 3.3. Solo

A região do Cariri cearense apresenta solos profundos e bem drenados. É caracterizada por uma tipologia diversificada e expressiva variação espacial dos solos. A bacia do riacho São José enquadra-se em três diferentes tipos de solo: os argissolos vermelho-amarelo, os neossolos e os latossolos vermelho-amarelo como mostra a Figura 5.



**Figura 5** – Mapas de classes de solos na bacia hidrográfica do riacho São José  
(Adaptado de FUNCEME, 2006)

Os argissolos vermelho-amarelo são solos espessos, com boa condição de drenagem apresentando profundidades variáveis. Sua textura é composta de areia franca, possuindo partículas de solo considerada média e fina.

Os neossolos alternam de pouco a muito profundos e geralmente possuem variados aspectos de coloração. Sua textura varia de areia à argilosa com consistência desde macia até extremamente dura quando seco.

Os latossolos vermelho-amarelo geralmente são profundos ou muito profundos, porosos e bem drenados. Sua composição texturial é média e raramente argilosa. As estruturas são fracas e granular pequena.

### 3.4. Morfologia

A bacia do riacho São José está inserida em três zonas distintas: zona de chapada, zona de talude e zona de pediplano.

A zona da chapada apresenta relevo tabular quase plano, formando uma extensa “mesa” limitada em quase toda sua extensão por escarpas abruptas, de contornos irregulares e desníveis consideráveis.

A zona de talude representa o sopé da chapada, constituído pelas falésias (DNPM, 1996).

A zona de pediplano constitui uma vasta depressão topográfica onde se encontra o Vale do Cariri (CEARÁ, 2005).

### 3.5. Vegetação/Usos e ocupação do solo

Os aspectos vegetais estão associados principalmente às características edafoclimáticas e morfológicas. Na zona de pediplano da bacia predomina a caatinga arbórea arbustiva ou mata seca, na zona de chapada observa-se a floresta úmida subperenifólica com transição no sentido noroeste-sudeste para o cerradão, cerrado e carrasco (Figura 6).



(a)



(b)

**Figura 6** – Caatinga arbórea arbustiva (a) e floresta úmida subperenifólia (b)

A caatinga arbórea é a unidade de vegetação primária que dominou a zona de pediplano em tempos passados. Com a ocupação dos sertões pela pecuária extensiva e a agricultura, ao longo dos anos, praticamente toda a cobertura vegetal natural foi transformada, configurando-se como uma caatinga arbustiva.

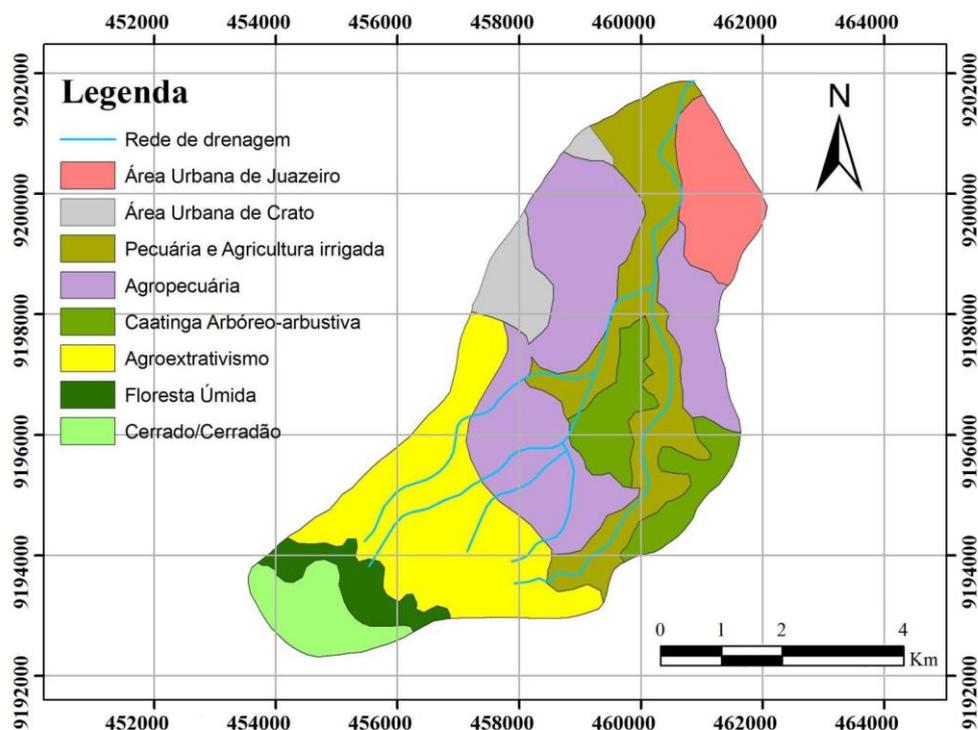
As atividades relacionadas ao desenvolvimento da agricultura nos vales irrigados da região do Cariri, são principalmente a cana-de-açúcar, o algodão herbáceo, banana, arroz, feijão etc (MARQUES, 2001).

Os sistemas agropecuários são preponderantes do Vale no Cariri. A pecuária extensiva é representada principalmente pela bovinocultura, destacando-se também a criação de ovinos, caprinos, suínos e aves.

A agricultura e o cultivo de árvores frutíferas, combinam-se com atividades extrativistas gerando o que se chama conjunto de sistemas complexos de produção agroextrativista. Estas atividades são produzidas em larga escala na porção cearense da Bacia Sedimentar do Araripe e, conseqüentemente, na área de estudo.

Na zona de chapada, a floresta úmida subperenifólia e o cerrado/cerradão encontram-se na Floresta Nacional do Araripe, uma área de preservação ambiental. Esta área apresenta uma composição florística rica e uma fisionomia de caráter florestal, dada às condições mais favoráveis como solo profundo e úmido, e densa serrapilheira (ALENCAR, 2007).

O mapa de uso e ocupação do solo na área de estudo encontra-se na Figura 7.



**Figura 7** – Mapa de uso e ocupação do solo da bacia do riacho São José  
(Adaptado de FUNCEME, 2006)

### 3.6 Recursos Hídricos

Na zona de chapada não existe rede de drenagem definida, devido a alta capacidade de infiltração do solo na área. A elevada concentração de fontes (perenes e sazonais) e de nascentes fluviais na zona de talude contribui para formação ramificada do sistema de drenagem da zona de pediplano, dando origem ao rio Salgado, responsável pela drenagem de toda a região do Vale do Cariri (FUNCEME, 2006).

As águas que escoam na bacia do riacho São José, nos meses que sucedem à paralisação das chuvas é decorrente do fluxo de base do aquífero arenítico Rio da Batateira que aflora na área.

A Figura 8 mostra o exutório da bacia do riacho São José, na confluência com o Rio Salgado no ano de 2008.



**Figura 8** – Exutório da bacia do riacho São José

No Vale do Cariri os recursos hídricos subterrâneos representam a mais importante fonte de abastecimento público e privado, com uso para abastecimento humano, dessedentação de animais, irrigação, indústria e lazer. Estas águas estão localizadas principalmente no Sistema Aquífero Médio, que é composto basicamente por arenito.

Neste sistema aquífero a superexploração da água subterrânea para diversos usos tem interferido no fluxo de base de rios, riachos e lagoas perenes, tornando-os intermitentes e/ou efêmeros e modificando a paisagem. O riacho São José é um dos poucos que se mantém perene nesta região, apesar do elevado assoreamento provocados por ações antrópicas de uso e ocupação do solo (Figura 9).



**Figura 9** - Visão panorâmica do riacho São José

## 4 MATERIAL E MÉTODOS

### 4.1. Delimitação da bacia hidrográfica

A bacia do riacho São José foi delimitada a partir de cartas topográficas da SUDENE digitalizadas, na escala de 1:100.000 (Crato, Barbalha e Juazeiro do Norte), de onde foram extraídas as curvas de nível, pontos cotados e rede de drenagem no aplicativo *ArcView 9.3* da ESRI. Posteriormente foi completada, para a confecção do MNT (Modelo Numérico do Terreno) que segundo Rocha (2000) é uma representação matemática computacional da ocorrência de um determinado fenômeno espacialmente distribuído numa região limitada da superfície terrestre.

De posse da delimitação da área da bacia, obteve-se os parâmetros morfométricos.

### 4.2. Parâmetros morfométricos

#### 4.2.1. Forma da bacia

Na determinação dos parâmetros de forma, área de drenagem (A), perímetro da bacia (P) e comprimento do talvegue (C), foi utilizado o comando de operações métricas do software *ArcView 9.3* da ESRI. As metodologias utilizadas na determinação dos parâmetros fator de forma (F) e coeficiente de compacidade (Kc) estão descritas respectivamente nos subítens 4.2.1.1 e 4.2.1.2.

##### 4.2.1.1. Fator de forma

O fator de forma (F) relaciona a forma da bacia com a de um quadrado, correspondendo à razão entre a área de drenagem e o comprimento do talvegue (da foz ao ponto mais longínquo do espigão) (Equação 1).

$$F = \frac{A}{L^2} \dots\dots\dots (1)$$

Sendo:

A = área de drenagem (m<sup>2</sup>);

L = comprimento do eixo da bacia (m).

A forma da bacia pode atuar sobre alguns processos hidrológicos ou sobre o comportamento hidrológico da bacia. Segundo Villela e Mattos (1975), uma bacia com um fator de forma baixo é menos sujeita a enchentes que outra de mesma área, porém com fator de forma maior.

#### 4.2.1.2. Coeficiente de compacidade

O coeficiente de compacidade (Kc) relaciona a forma da bacia com um círculo e corresponde a razão entre o perímetro da bacia e o de uma circunferência de mesma área da bacia (Equação 2).

$$Kc = 0,28 \cdot \frac{P}{\sqrt{A}} \dots\dots\dots (2)$$

Em que:

P = perímetro (km);

A = área de drenagem (km<sup>2</sup>).

Um Kc mínimo igual à unidade corresponde a uma bacia circular e, para uma bacia alongada, seu valor é significativamente superior à unidade. A bacia será mais susceptível a enchentes quanto mais seu parâmetro Kc for próximo da unidade.

#### 4.2.2. Relevo da bacia

Segundo Righetto (1998), a declividade do terreno de uma bacia é responsável pela velocidade de escoamento superficial, portanto a determinação do relevo de uma bacia hidrográfica é de grande importância.

#### 4.2.2.1. Declividade média da bacia

O escoamento superficial é influenciado pela declividade dos terrenos de uma bacia. Quanto mais íngreme for o terreno, mais rápido será o escoamento superficial, o tempo de concentração será menor e os picos de enchente maiores. Para determinação dos valores representativos da declividade do terreno da bacia do riacho São José utilizou-se o método das quadrículas.

Esse método consiste em lançar uma malha quadriculada sobre o mapa topográfico da bacia, com os pontos de interseção das linhas assinalados. Em cada ponto foi determinada uma declividade (obtida pelo quociente entre a diferença de cotas e a distância medida em planta entre as curvas de níveis subseqüentes). Após a determinação da declividade dos pontos, construiu-se uma tabela de distribuição de frequência, tomando-se uma amplitude para as classes, de onde se calculou a declividade média da bacia utilizando a Equação 3.

$$\bar{D} = \frac{\sum x_i \cdot f_i}{\sum f_i} \dots\dots\dots (3)$$

Em que  $x_i$  e  $f_i$  são respectivamente o ponto médio e a frequência da classe.

#### 4.2.2.2. Declividade média do curso principal

A declividade média do curso principal ( $\bar{d}$ ) é diretamente proporcional a velocidade de escoamento das águas no leito do rio. Neste trabalho, a declividade do rio principal foi obtida através da média harmônica ponderada da raiz quadrada das declividades dos diversos trechos retilíneos, tomando-se como peso a extensão de cada trecho (Equação 4):

$$\bar{d} = \left( \frac{\sum l_i}{\sum \left( \frac{l_i}{\sqrt{d_i}} \right)} \right)^2 \dots\dots\dots (4)$$

Em que:

$l_i$  = extensão de cada trecho do curso principal;

$d_i$  = declividades dos diversos trechos retilíneos.

#### 4.2.3. Sistema de drenagem

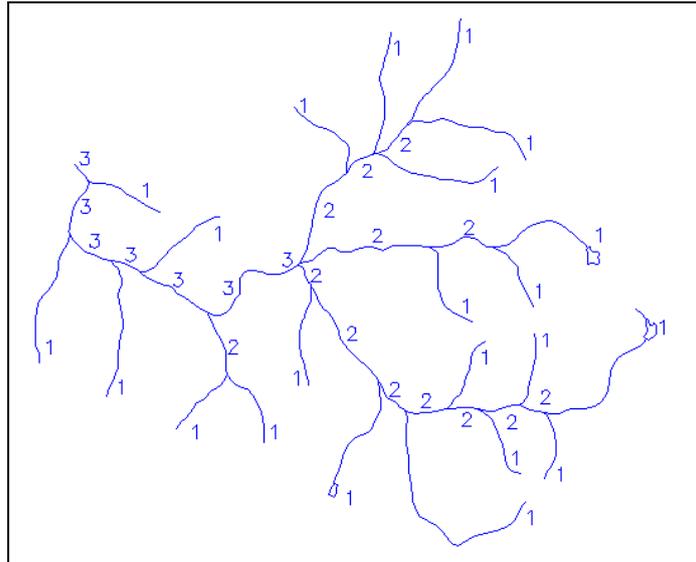
Na determinação dos parâmetros do sistema de drenagem comprimento do curso d'água principal ( $L_p$ ) e comprimento total da rede de drenagem ( $\sum L_i$ ) foi utilizado o comando de operações métricas do software *ArcView 9.3* da ESRI. As metodologias utilizadas na determinação dos parâmetros razão de bifurcação (Rb) e densidade de drenagem (Dd) estão descritas respectivamente nos sub itens 4.2.3.1 e 4.2.3.2.

##### 4.2.3.1. Razão de bifurcação

Segundo Horton (1945) e Strahler (1957) a bifurcação de uma rede de drenagem de uma bacia pode ser conhecida e avaliada através da razão de bifurcação (Rb), dada pelo coeficiente angular da reta de correlação obtida a partir do gráfico  $N_u \times u$  ( $N_u = a + bu$ ), onde  $u$  é a ordem dos cursos d'água e  $N_u$  é a contagem das mesmas (Equação 5).

$$Rb = b = \frac{\Delta N_u}{\Delta u} \dots\dots\dots (5)$$

Desta forma, quanto maior a razão de bifurcação, menos propensa a cheia será a bacia. Segundo Tucci (2001), a ordem dos cursos d'água é uma classificação que representa o grau de ramificação do sistema de drenagem de uma bacia. Seguindo o critério de Strahler (1957), os cursos d'água sem tributários serão denominados de ordem "1", ou primeira ordem; os que recebem somente tributários de primeira ordem, independentemente do número de tributários, serão denominados de segunda ordem; os que recebem dois ou mais tributários de segunda ordem, podendo também receber tributários de primeira ordem, serão denominados de terceira ordem, e assim sucessivamente (Figura 10).



**Figura 10** – Classificação da ordem dos rios segundo Strahler (1957)

#### 4.2.3.2. Densidade de drenagem

A densidade de drenagem ( $Dd$ ) indica a eficiência de drenagem de uma bacia hidrográfica e é expressa pela relação entre o somatório dos comprimentos de todos os cursos da rede (sejam eles perenes, intermitentes ou efêmeros) e a área total da bacia (Equação 6).

$$Dd = \frac{\sum L_i}{A} \dots\dots\dots (6)$$

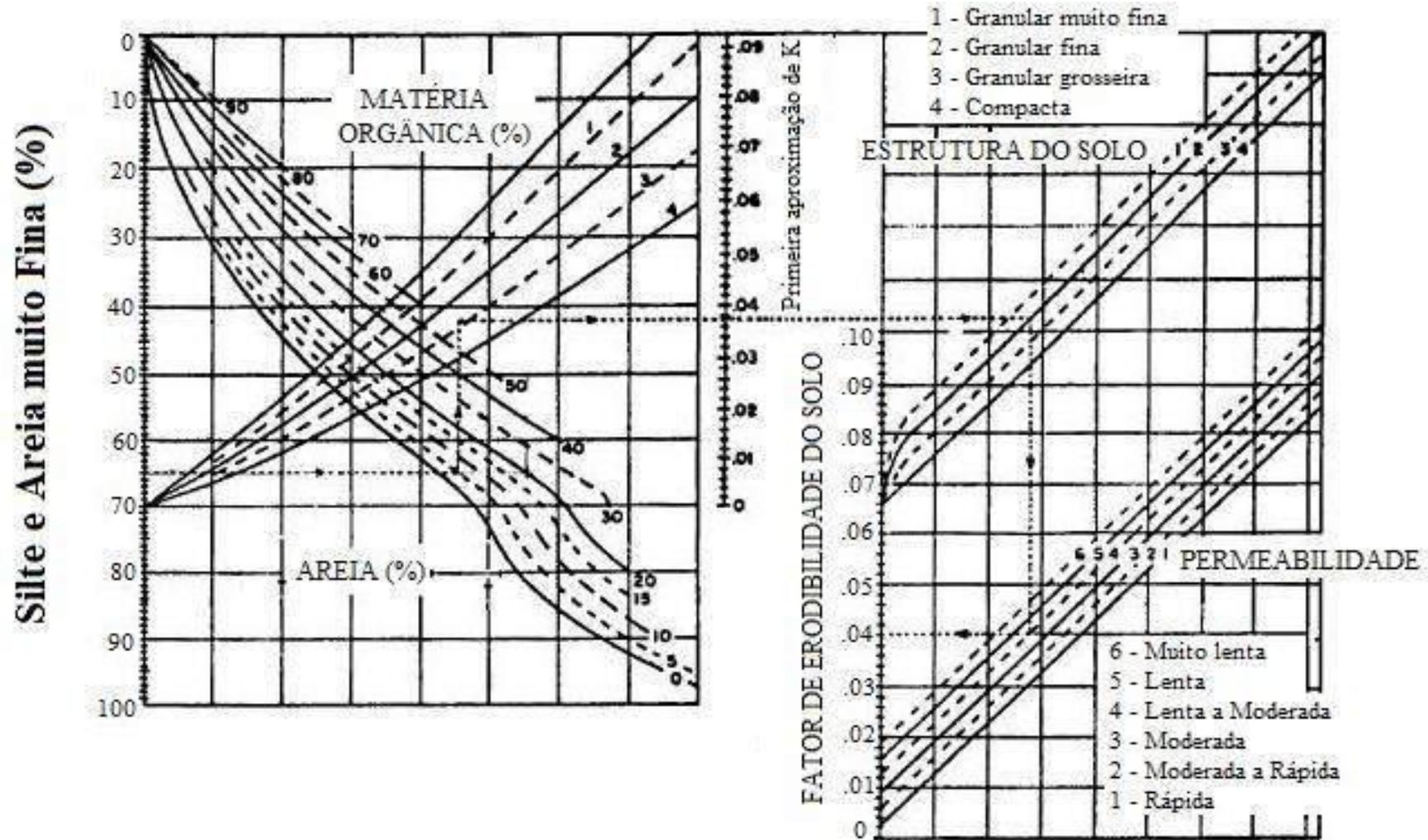
Em que:

$L_i$  = comprimento total dos cursos d'água de uma bacia hidrográfica e;

$A$  = área total da bacia

### 4.3. Erodibilidade do solo

O mais conhecido método indireto para estimar a erodibilidade do solo ( $K$ ) é o nomograma proposto por Wischmeier e Smith (1978) e publicado por Foster et al. (1981) (Figura 11). O nomograma de erodibilidade do solo inclui cinco parâmetros: % de argila, % de areia grossa, % de matéria orgânica (MO), estrutura (S) e permeabilidade (P).



**Figura 11** – Nomograma para determinação da erodibilidade K da EUPS

(adaptado FOSTER et al., 1981)

Nessa pesquisa os valores de erodibilidade foram obtidos através da equação de regressão múltipla que originou o nomograma (Equação 7).

$$K = \frac{0,1317.(A+B+C)}{100} \dots\dots\dots (7)$$

Em que:

$$A = 2,1 \cdot 10^{-4} \cdot (12 - m_o) \cdot [(silt + af) \cdot (100 - arg)]^{1,14}$$

$$B = 3,25 \cdot (S_1 - 2)$$

$$C = 2,5 \cdot (P_1 - 3)$$

K = erodibilidade do solo (ton.h.MJ<sup>-1</sup>.mm<sup>-1</sup>);

m<sub>o</sub> = percentual de matéria orgânica;

sil = percentual de silte;

af = percentual de areia muito fina;

arg = percentual de argila;

S<sub>1</sub> = parâmetro que descreve a estrutura do solo;

P<sub>1</sub> = parâmetro que descreve a permeabilidade;

O parâmetro S<sub>1</sub> que descreve a estrutura do solo corresponde as classes de estrutura proposto por Wischmeier e Smith (1978), definidas a partir da ARS - USDA (1994) para cada tipo de solo (Tabela 2). Considera-se classe granular muito fina, partículas com diâmetros menores que um milímetro (silte – argila); granular fina, com diâmetros entre um e dois milímetros (areia fina – silte); granular grosseira, com diâmetros superiores a dois milímetros (areia); e compacta, correspondente a pedregulho.

**Tabela 2** - Classes de estrutura do solo

S <sub>1</sub>	Descrição
1	Granular muito fina
2	Granular fina
3	Granular grosseira
4	Compacta

Fonte: Adaptado (ARS - USDA, 1994).

O parâmetro  $P_1$  descreve a classe de permeabilidade obtida a partir da textura e da condutividade hidráulica saturada do solo, proposto por ARS - USDA (1994) (Tabela 3).

**Tabela 3** – Classes de permeabilidade em relação a textura e condutividade hidráulica do solo

Textura	$P_1$	Condutividade hidráulica (mm/h)
Argila siltosa, argila	6	< 1
Argila siltosa, argila arenosa	5	1 – 2
Argila arenosa, franco argilosa	4	2 – 5
Argiloso	3	5 – 20
Argiloso arenoso, arenoso	2	20 – 60
Areia	1	> 60

Fonte: Adaptado (ARS - USDA, 1994).

De acordo com Freire e Pessoti (1978) os valores da erodibilidade do solo ( $K$ ) são divididos em classes de potencial da erodibilidade de acordo com a Tabela 4.

**Tabela 4** - Classes do potencial à erodibilidade

Potencial	Classes de Erodibilidade (ton.h.MJ <sup>-1</sup> .mm <sup>-1</sup> )
Muito Alta	acima de 0,065
Alta	de 0,045 a 0,065
Média	de 0,032 a 0,045
Baixa	de 0,013 a 0,032
Muito Baixa	até 0,013

Fonte: Freire e Pessoti (1978).

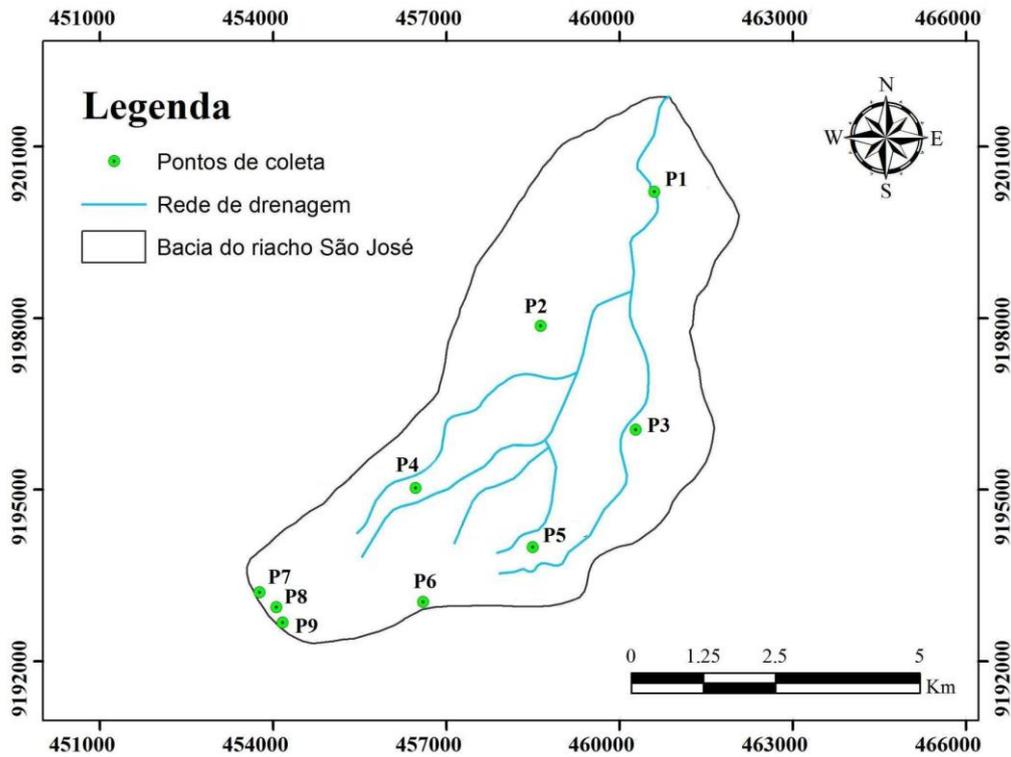
#### 4.4. Obtenção dos parâmetros utilizados na determinação da erodibilidade

##### 4.4.1. Pontos de amostragens e coletas de solo

Foram utilizadas coletas de amostras de solo em nove pontos distribuídos nos três tipos de solos (argissolos, neossolos e latossolos) entre os meses de Março e Junho de 2010 (Figura 12). Com auxílio de mapa e GPS os pontos foram georreferenciados conforme a Tabela 5.

**Tabela 5** – Pontos amostrados georreferenciados (UTM, SAD 69, Zona 24S)

Pontos	Latitude (m)	Longitude (m)
P1	9201411	460413
P2	9197659	458689
P3	9196792	460021
P4	9195 985	456409
P5	9193816	458479
P6	9192194	456529
P7	9193207	453769
P8	9192942	454060
P9	9192678	454166



**Figura 12** – Pontos de amostragem para coleta de solos na área de estudo

A amostragens indeformadas foram feitas com auxílio de amostradores de solos cilíndricos de 10 cm de diâmetro e 15 cm de altura (Figura 13). A extração das amostras foram efetuadas após penetração do amostrador no solo, sem movimentos bruscos, de modo a minimizar as perturbações (Figura 14). Estas amostras foram utilizadas na obtenção da permeabilidade do solo.



**Figura 13** – Cilindros utilizados para extração das amostras



**Figura 14** – Amostragem de solo indeformado na bacia do riacho São José

As amostragens deformadas foram efetuadas através de trado helicoidal nos primeiros 20 cm de profundidade. Estas amostras foram utilizadas na análise granulométrica e na quantificação do teor de matéria orgânica.

#### **4.4.2. Determinação da granulometria e do teor de matéria orgânica**

A composição granulométrica e o teor de matéria orgânica foram determinados no Laboratório de Análises de Física do Solo da UFC. A composição granulométrica foi determinada através de um conjunto de peneiras, nas quais as amostras foram divididas em cinco frações: areia muito grossa (2 – 1mm), grossa (1 - 0,5mm), média (0,5 - 0,25mm), fina (0,25 - 0,1mm) e muito fina (0,1 - 0,05mm) (Figura 15). Os percentuais de argila e silte foram determinados através do método da pipeta (EMBRAPA, 1997), utilizando-se como dispersante químico o hidróxido de sódio. Neste procedimento pipeta-se um volume da suspensão, para determinar o teor de argila após secagem em estufa, o teor de silte corresponde ao complemento dos percentuais de 100%, após conhecimento do percentual de areia (FIGURA 16).



**Figura 15** – Peneiras utilizadas na determinação das frações de solo



**Figura 16** – Amostras em cilindro de sedimentação

O teor de matéria orgânica foi determinado via oxidação (Walkley-Black), utilizando o dicromato de potássio em meio sulfúrico, tendo como fonte de energia o calor desprendido por reação com ácido sulfúrico e/ ou aquecimento (EMBRAPA, 1997) (Figura 17). Neste procedimento o excesso de dicromato após oxidação foi titulado com solução padrão de sulfato ferroso amoniacal para obtenção da matéria orgânica (Figura 18).



**Figura 17** – Dicromato de potássio sendo aquecido



**Figura 18** – Processo de titulação das amostras

#### 4.4.3. Permeabilidade do solo

A permeabilidade do solo ( $k$ ) foi obtida no Laboratório de Recursos Hídricos da UFC *Campus* do Cariri, utilizando-se permeômetro de carga variável (Figura 19). Os procedimentos experimentais foram realizados seguindo a NBR-14545/2000 da ABNT.



**Figura 19** - Permeômetro de carga variável

A equação utilizada no cálculo da permeabilidade foi deduzida a partir da Lei de Darcy (Equação 8).

$$k = 2,3 \frac{a \cdot L}{A \cdot t} \log \frac{h_i}{h_f} \dots\dots\dots (8)$$

Em que:

k = coeficiente de permeabilidade do solo;

a = área da seção transversal da bureta graduada onde são lidas as cargas hidráulicas inicial e final;

L = altura da amostra de solo;

A = área da seção transversal da amostra de solo;

t = tempo decorrido durante o ensaio;

$h_i$ ,  $h_f$  = cargas hidráulicas inicial e final, respectivamente.

#### **4.5. Variabilidade espacial dos dados**

De posse dos dados de erodibilidade do solo, obtidos através da equação de regressão múltipla proposta por Wischmeier e Smith (1978), realizou-se uma estimativa da variabilidade espacial dos dados deste parâmetro através de uma análise geoestatística. Esta análise consiste em apresentar uma distribuição espacial confiável de um parâmetro em uma determinada área, supondo que os valores da variável, considerada como regionalizada, sejam espacialmente correlacionados (SILVA JÚNIOR, 2006).

A variografia foi a técnica utilizada, sendo representada por um gráfico chamado de variograma. Os pontos do variograma representam a média aritmética do quadrado das diferenças de todos os pares de pontos que estão separados por um vetor distância em um dado módulo e direção. A variância experimental é dada pela Equação 9.

$$\gamma(d) = \frac{\sum [(Z(x_i) - Z(x_i + d))]^2}{2N(d)} \dots\dots\dots (9)$$

$\gamma$  – variância experimental, obtida pelos valores amostrados  $Z(x_i)$  e  $Z(x_i + d)$ ;

$Z(x_i)$  – valor amostral da variável estudada no ponto  $x_i$ ;

$Z(x_i + d)$  – valor amostral da variável estudada no ponto  $(x_i + d)$ ;

$d$  – distância entre os pontos amostrais  $e$ ;

$N(d)$  – número de pares possíveis, dentro da malha de amostragem, com distância  $d$ .

O variograma experimental foi analisado através de seus componentes (alcance, efeito pepita e patamar) e dos variogramas teóricos ajustados. Esse ajuste foi realizado por sucessivas modelagens para se obter um modelo que mais se aproxime do variograma experimental. Foram testados os modelos exponencial, esférico e gaussiano.

Para definir o melhor modelo teórico aplicável aos dados de erodibilidade do solo foi realizada a validação cruzada, no qual consiste em verificar a diferença entre o valor experimental e o valor estimado. Esta estimativa foi obtida através da krigagem caracterizada por cada um dos diferentes variogramas teóricos aplicados.

De posse desses dados para cada variograma teórico, determinaram-se os seguintes critérios de seleção do variograma a ser aplicado na interpolação por krigagem pontual: o coeficiente de determinação ( $R^2$ ) da análise de regressão linear, o erro quadrático médio (Equação 10) e a análise estatística descritiva, considerando média, valor mínimo, valor máximo e variância.

$$EQM = \frac{(z_{i_{obs.}} - z_{i_{calc.}})^2}{n} \dots\dots\dots (10)$$

Onde:

EQM – erro quadrático médio;

$z_{i_{obs}}$  – valores observados do parâmetro;

$z_{i_{calc}}$  – valores calculados do parâmetro por validação cruzada e;

n – número de valores da série de dados.

Em seguida, realizou-se a interpolação por krigagem pontual (Equação 11), pelo melhor modelo teórico escolhido a partir da análise do coeficiente de determinação, do erro quadrado médio e da estatística descritiva. O processo de interpolação foi obtido pelos aplicativos *GS + Geoestatics e Surfer 8.0*, que criou o variograma e o mapa de isolinhas para os índices de erodibilidade e pelo *ArcView 9.3* da ESRI que gerou um mapa de interpolação desses dados.

$$Z^*(x) = \sum \gamma_i Z(x_i) \dots\dots\dots (11)$$

$Z^*(x)$  – valor estimado através do método de krigagem a um determinado passo de distância;

$\gamma_i$  – peso de cada valor medido e;

$Z(x_i)$  – valor medido em um passo de distância.

#### **4.6. Critérios para mapeamento de classes de susceptibilidade à erosão do solo**

O estudo de susceptibilidade aos fenômenos é fundamental para compreensão da dinâmica entre os elementos físicos e sociais que compõe a superfície terrestre. Para a confecção do mapa de susceptibilidade à erosão utilizou-se a metodologia proposta por Fernandes et al. (2007), que considera quatro principais etapas:

I - Extração de mapas temáticos pedológico, uso e ocupação do solo, declividade e erodibilidade da área a ser analisada;

II - Determinação de pesos para cada um dos temas de acordo com o grau de susceptibilidade que os mesmos possam representar;

III - Combinação dos temas efetuando as somas dos pesos e;

IV – Classificação dos graus de susceptibilidade.

A estrutura e geração do mapa de susceptibilidade foram efetuadas utilizando o software *ArcView 9.3* da ESRI, e os pesos foram determinados levando-se em consideração a susceptibilidade dos fatores.

A partir do mapa pedológico gerado pela Funceme (2006) e com base no critério de Salomão (1999), que define as classes de susceptibilidade à erosão para cada tipo de solo (Tabela 6), foram adotados pesos de 1 a 4 para solos de classes de erodibilidade variando de nula a muito forte, respectivamente.

**Tabela 6** - Pesos de acordo com tipo de solo e classes de erodibilidade

Classes de erodibilidade	Unidades pedológicas	Pesos
muito forte	cambissolos, neossolos líticos, plintossolos, chernossolos argilosos, nitossolos, vertissolos, planossolos (arbruptos textura arenosa média) e neossolos quartzarênicos.	4
forte - moderada	argissolos, alissolos, luvisolos (não abruptos, textura média, argilosa e textura média) e alissolos (de textura argilosa).	3
fraca	latossolo (de textura média) e latossolo (de textura argilosa).	2
nula	gleissolos, organossolos, plintossolos, chernossolos e espodossolos (em relevo plano).	1

Fonte: Adaptado de Salomão (1999).

O mapa de uso e ocupação do solo é considerado de grande importância em qualquer tipo de análise ambiental, servindo para demonstrar o quanto de pressão antrópica sofrem as unidades geoambientais da área. Com base no mapa de uso e ocupação do solo da área de estudo, gerado pela Funceme (2006), foram atribuídos pesos para a variável uso do solo, onde os mais altos expressam os menores graus de proteção. A escolha dos pesos seguiu o critério adotado por Salomão (1999), que define quatro classes de uso e ocupação do solo (Tabela 7), e atribui seu grau de proteção muito fraco a alto, com pesos de respectivamente 4 e 1, com variação de 1 entre classes.

**Tabela 7** – Pesos de acordo com uso e ocupação

Tipo de uso e ocupação	Grau de proteção do solo	Pesos
culturas anuais, estradas e áreas urbanizadas	muito fraco	4
culturas perenes, cana-de-açúcar e pastagem	fraco	3
pasto sujo e campo cerrado	médio	2
reflorestamento, capoeirão e florestas	alto	1

Fonte: Adaptado de Salomão (1999).

A partir do mapa de declividade, obtido do Modelo Numérico do Terreno (MNT), utilizando o programa *Global Mapper*® para inserir os dados georreferenciados do levantamento SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) e com base nos critérios de Ross (1994) e Ramalho Filho e Beek (1995), que definem classes de declividade do relevo (Tabela 7), foram definidos para relevos plano a montanhoso, pesos de respectivamente 1 e 8, com variação de 2 entre classes, a partir do peso 2.

Os critérios utilizados na avaliação das declividades tiveram como base a energia potencial gravitacional. Isto implica que quanto mais íngreme for à encosta maior será a energia potencial gravitacional, tanto das partículas do material inconsolidado como do corpo rochoso e, portanto, maior será o potencial de ocorrer deslizamento e arrasto.

A Tabela 8 mostra a definição de Ramalho Filho e Beek (1995) para classes de declividade do terreno em relação ao relevo, com seus respectivos pesos.

**Tabela 8** – Pesos de acordo com as classes de declividade em relação ao relevo

Declividade do terreno (%)	Classes	Pesos
0 a 3	plana	1
3 a 8	suavemente ondulada	2
8 a 20	ondulada	4
20 a 40	forte ondulada	6
> 40	montanhosa	8

Fonte: Ramalho Filho e Beek (1995).

A partir do mapa de erodibilidade, obtido por krigagem, utilizando o aplicativo *ArcView* 9.3 da ESRI, após análise geoestatística para escolha do melhor modelo teórico, e com base no critério de Freire e Pessoti (1978), que define as classes de susceptibilidade a erosão (Tabela 9), foram definidos para solos de muito baixa a muito alta

susceptibilidade, pesos de respectivamente 1 e 8, com variação de 2 entre classes, a partir do peso 2.

**Tabela 9** – Pesos em relação as classes de susceptibilidade a erosão e a erodibilidade

Classes de susceptibilidade	Erodibilidade (ton.h.MJ <sup>-1</sup> .mm <sup>-1</sup> )	Pesos
muito baixa	até 0,013	1
baixa	de 0,013 a 0,032	2
média	de 0,032 a 0,045	4
alta	de 0,045 a 0,065	6
muito alta	acima de 0,065	8

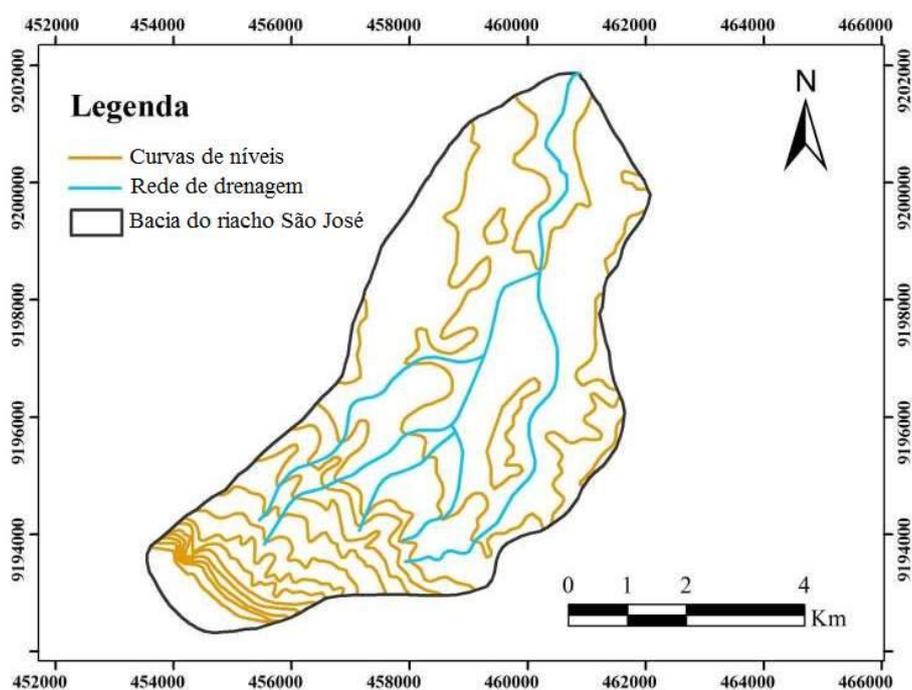
Fonte: Freire e Pessoti (1978).

O mapa de susceptibilidade à erosão da bacia do riacho São José, foi elaborado utilizando o procedimento analítico que envolve o processamento de mapas digitais, utilizando-se linguagens e operadores de *álgebra de mapas* (TOMLIN, 1990; BERRY, 1993). Neste procedimento, os quatro mapas temáticos gerados a partir dos pesos adotados (pedológicos, uso e ocupação do solo, declividade e erodibilidade) foram cruzados gerando classes temáticas de susceptibilidade à erosão. Neste procedimento foram definidos para áreas de muito baixa, baixa, média, alta e muito alta susceptibilidade à erosão, valores compreendidos nos respectivos intervalos de classe: até 5, de 5 a 9, de 9 a 14, de 14 a 19 e acima de 19, com mínimo em 4 e máximo em 24.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1. Caracterização morfométrica

A delimitação da bacia do riacho São José e o traçado da rede de drenagem, determinados por meio de cartas topográficas e digitais e com uso do software *ArcView* 9.3 da *ESRI*, estão apresentados na Figura 20. A Tabela 10 mostra a síntese dos parâmetros morfométricos obtidos.



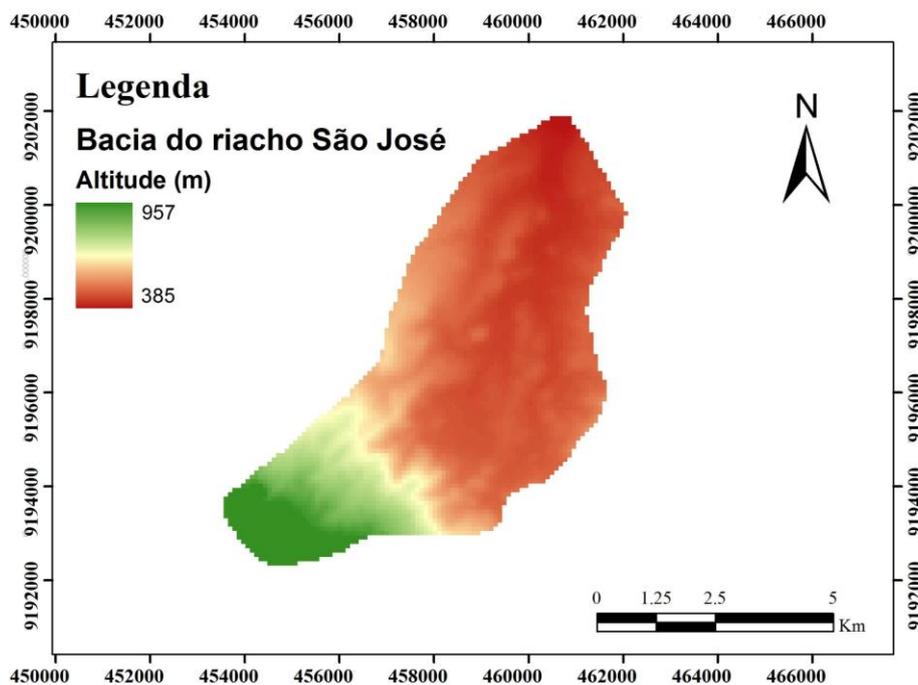
**Figura 20** – Delimitação da bacia hidrográfica do riacho São José

**Tabela 10** - Síntese dos parâmetros morfométricos obtidos para a bacia do riacho São José

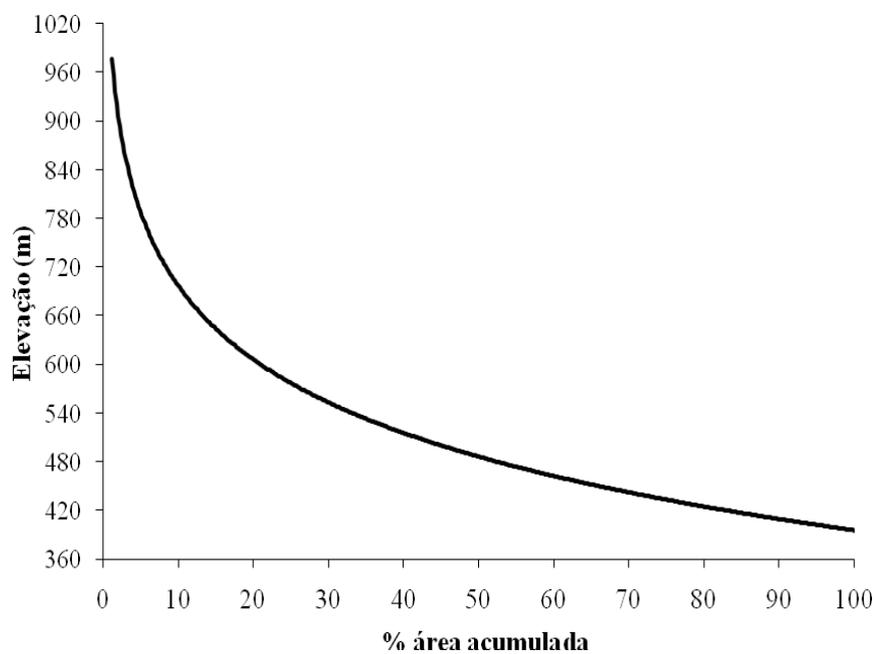
Elementos Fisiográficos	Parâmetro	Valor	Unidade
Forma Superficial	Área	40	km <sup>2</sup>
	Perímetro	28,6	km
	Comprimento do talvegue	11,3	km
	Fator de forma	0,31	-
	Coefficiente de compacidade	1,26	-
Relevo	Cota máxima	957	m
	Cota média	671	m
	Cota mínima	385	m
	Declividade média da bacia	0,0768	m/m
	Declividade média do curso principal	0,0143	m/m
Rede de drenagem	Ordem da bacia	3 <sup>a</sup> .	-
	Comprimento total dos cursos	60,9	km
	Densidade da rede de drenagem	1,52	km/km <sup>2</sup>
	Razão de bifurcação	2,33	-
	Comprimento do curso d'água principal	11,04	km

A Figura 21 mostra o mapa de altitudes e Figura 22 apresenta a curva hipsométrica da bacia hidrográfica do riacho São José.

De acordo com a Tabela 10, quanto à forma, a bacia do riacho São José possui área de 40 km<sup>2</sup> e perímetro de 26,8 km. Estes valores são próximos dos obtidos por Lima Neto et al. (2008) para a bacia do rio Batateira, localizada no município do Crato, que foram de respectivamente 45,6 km<sup>2</sup> e 37 km.



**Figura 21** – Altitude da bacia hidrográfica do riacho São José



**Figura 22** – Curva hipsométrica da bacia do riacho São José

Conforme a Figura 21, a bacia do riacho São José possui altitude que varia de 957 m, no topo da Chapada do Araripe, a 385 m, no Vale do Cariri, próximo ao exutório. Predominantemente, ocorrem cotas abaixo de 500 m e as maiores declividades estão presentes na encosta da chapada.

Comparando os parâmetros morfométricos da bacia do riacho São José com os da bacia do rio Batateiras é possível entender a dinâmica ambiental local, principalmente quando o ambiente em questão está sofrendo alterações em parte dos cursos d'água.

Com relação a forma superficial da bacia observa-se na Tabela 10 que a bacia do riacho São José apresenta menor coeficiente de compacidade e maior fator de forma que a bacia do rio Batateira, com valores respectivamente de 1,53 e 0,20, indicando que a bacia do riacho São José é mais estreita e alongada (menor fator de forma) e mais irregular (maior coeficiente de compacidade), indicando uma menor possibilidade de ocorrência de recobrimento simultâneo de toda área durante período de chuvas intensas.

Quanto ao relevo, a bacia do riacho São José possui menor declividade média quando comparada a bacia do rio Batateiras (0,1075 m/m), indicando que a mesma deve apresentar escoamento superficial mais lento, ou seja, os tributários deverão conduzir água para o rio principal de forma mais lenta. Com relação à declividade média do curso principal, o riacho São José apresenta maior valor que a declividade do rio Batateiras (0,0062 m/m), indicando que o mesmo deve conduzir água com maior velocidade. Mas, este efeito deve ser minimizado uma vez que os tributários do riacho São José contribuem lentamente para ele. A curva hipsométrica da Figura 22 mostra que o riacho São José apresenta um perfil longitudinal bastante acidentado no curso superior. No curso inferior, onde corta as planícies aluviais, os perfis assinalam baixa declividade. Observa-se que cerca de 20% da bacia compreendem a encosta da chapada com área de declividade mais acidentada, com cotas de aproximadamente 1000 a 550 m.

Quanto a rede de drenagem, segundo VILELA e MATTOS (1975), as duas bacias possuem densidade de drenagem dentro do intervalo proposto para bacias medianamente drenadas (0,5 km/km<sup>2</sup> a 3,0 km/km<sup>2</sup>, pois a bacia do rio Batateiras

apresentou densidade de drenagem 0,85 km/km<sup>2</sup>. Já a razão de bifurcação indica que a bacia do riacho São José apresenta-se menos propensa a cheias, por apresentar maior valor que a bacia do rio Batateiras (4,0).

Assim, quanto aos parâmetros morfométricos analisados, observa-se que a bacia do riacho São José apresenta-se menos suscetível a enchentes em condições normais de precipitação (ou seja, excluindo-se os eventos extremos de precipitações).

Resultados semelhantes foram obtidos por Lima Neto et al. (2008) para a bacia do rio Granjeiro, localizada na zona urbana do Crato. Porém, nesta área foram identificadas ações antrópicas capazes de inverter o quadro, tornando-a mais propensa a cheias, tais como: a ocupação irregular nas áreas de preservação permanente; o desmatamento da encosta da chapada e da mata ciliar ao longo dos rios e riachos; e a impermeabilização dos interflúvios e da área de inundação do rio Granjeiro, onde o rio encontra-se contido num canal de concreto estreito, com elevado risco de extravasamento.

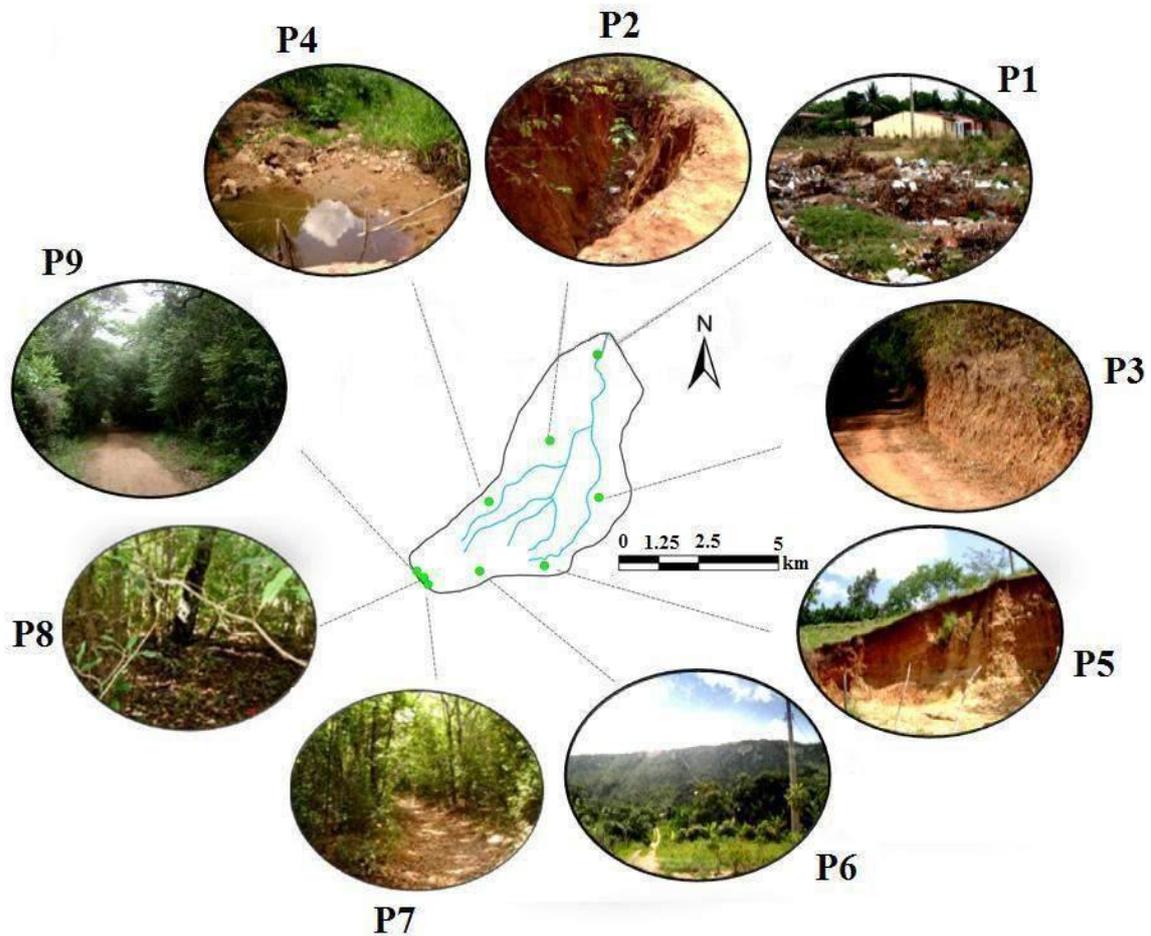
Como a bacia do riacho São José encontra-se numa área de conurbação das cidades de Juazeiro do Norte e Crato, além de abranger áreas onde há práticas de agropecuária e pecuária, agricultura irrigada e agroextrativismo, onde ações antrópicas podem se instalar, contribuindo, a exemplo da bacia do rio Granjeiro, com o aumento da susceptibilidade a enchentes e conseqüentemente com o transporte de sedimentos.

## **5.2. Avaliação Ambiental**

A avaliação ambiental da bacia do riacho São José foi feita a partir de identificação, em campo, dos impactos ambientais e de suas causas.

A maioria dos problemas e impactos ambientais observados na bacia do riacho São José tem origem nas áreas de maiores declividades, decorrentes de atividades antrópicas. Portanto, para a compreensão das relações de causa e efeito relacionadas aos impactos identificados na planície, deve-se analisar integralmente o conjunto planície/planalto e a zona de talude.

A Figura 23 localiza e ilustra os aspectos ambientais na bacia do riacho São José.



**Figura 23** – Localização e ilustração dos aspectos ambientais da área de estudo

O ponto P1 encontra-se na zona urbana de conurbação das cidades de Juazeiro do Norte e Crato. Nesta área observam-se algumas casas construídas, onde, em alguns casos são cultivadas hortas pelas famílias residentes. Como fator de degradação ambiental verificou-se a disposição inadequada de resíduos sólidos, tanto de origem doméstica quanto da construção civil (Figura 24).



**Figura 24** – Disposição inadequada de resíduos sólidos e expansão urbana encontrados na bacia do riacho São José

Em torno das residências as áreas são desmatadas e os solos visivelmente compactados, contribuindo com redução da capacidade de infiltração e aumento da velocidade do escoamento superficial. Em alguns casos foram observadas tubulações de lançamento de esgoto doméstico diretamente no solo superficial. Estas ocupações contribuem com o assoreamento do riacho na área (Figura 25).



**Figura 25** – Riacho São José assoreado

O ponto P2 encontra-se na zona de agropecuária. Nessa área observam-se processos erosivos intensos por ravinas e voçorocas e presença de cortes com remoção de sedimentos (Figura 26).



**Figura 26** – Presença de voçoroca e corte com remoção de sedimentos

O ponto P3 encontra-se na zona de pecuária e agricultura irrigada (Figura 27).



**Figura 27** – Área de agricultura na bacia do riacho São José

A retirada da vegetação para implantação de pastagens e para o preparo do solos agrícolas, principalmente quando se utiliza a prática de queimadas, provocam alterações na camada superficial, deixando-os susceptíveis a processos erosivos e alterações microclimáticas que interfere no balanço hídrico.

Os pontos P4 e P5 encontram-se em zona de agroextrativismo. Nesta área o agroextrativismo encontra-se combinado com a agricultura e o cultivo de áreas frutíferas, gerando um sistema complexo de produção agroextrativista, aumentando a susceptibilidade a erosão (Figura 28).



**Figura 28** – Área de produção agroextrativista

O ponto P6 encontra-se na zona de encosta e os pontos P7, P8 e P9 na zona da Chapada do Araripe. Nestas áreas não foram observados problemas ambientais, pois a ação antrópica não é evidente nas áreas. O ponto P6 encontra-se numa área onde surgem fontes de água mineral e os demais pontos na área de preservação ambiental.

### 5.3. Parâmetros utilizados na determinação da erodibilidade do solo

Na Tabela 11 são apresentados os teores de matéria orgânica, a granulometria e a permeabilidade das amostras de solos coletadas na bacia do riacho São José, até a profundidade de 20 cm.

**Tabela 11** – Teor de matéria orgânica, granulometria e permeabilidade das amostras dos solos coletadas na bacia do riacho São José

Amostras	mo%	arg%	sil%	amf%	af%	am%	ag%	amg%	k (mm/h)
P1	1,1	7,1	10,1	8,5	38,8	43,0	8,4	1,2	9,0 x 10 <sup>2</sup>
P2	0,6	6,5	5,9	11,2	62,5	23,9	4,1	1,8	5,0 x 10 <sup>2</sup>
P3	0,8	6,9	4,1	10,2	59,8	28,1	4,1	0,7	1,4 x 10 <sup>3</sup>
P4	1,2	11,1	13,8	14,4	62,2	22,7	0,9	0,5	1,3 x 10
P5	0,6	4,9	5,9	9,7	61,0	25,6	3,2	2,2	8,1 x 10
P6	1,9	11,3	7,0	9,2	43,9	35,9	9,5	3,5	9,4 x 10
P7	4,2	39,3	12,9	3,9	25,1	49,6	20,4	4,0	2,6 x 10 <sup>3</sup>
P8	4,1	38,9	9,6	4,3	23,5	49,8	23,7	4,3	2,3 x 10 <sup>3</sup>
P9	3,6	33,2	9,4	2,3	23,6	48,4	22,8	6,5	2,5 x 10 <sup>3</sup>

(mo – matéria orgânica, arg – argila, sil - silte, amf – areia muito fina, af – areia fina, am – areia média, ag – areia grossa, amg – areia muito grossa, k – permeabilidade)

De acordo com a Tabela 11, os solos amostrados nos pontos P2 a P6 (argissolos vermelho-amarelo e neossolos) apresentam uma maior predominância de areia fina com percentuais de 43,9 a 62,5%, enquanto que nos pontos P1, P7, P8 e P9 (argissolos e latossolos vermelho-amarelo) a predominância da textura do solo é de areia média com percentuais variando entre 43,0 a 49,6%.

Os solos coletados nos pontos P1, P2 e P6 foram classificados como areia franca, nos pontos P3 e P5, como areia, no ponto P4, como franco arenoso, nos pontos P7 e P8, como argila arenosa e no ponto P9, como franco argilo arenoso.

Quanto a permeabilidade, de acordo com os solos coletados no ponto P1 foram classificados como moderada a elevada e solos dos pontos P2, P3 e P5 a P9, como elevada. Já os solos do ponto P4, foram classificados como de permeabilidade moderada (classificação de ARS-USDA, 1994). Os solos dos pontos P7 e P8, localizadas na Floresta Nacional do Araripe (FLONA), os solos possuem maiores teores

de argila na estrutura e também maiores permeabilidades. Segundo Cheng et al. (2002) solos sob floresta normalmente apresentam significativa macroporosidade, proporcionada pelas raízes mortas e cavidades de animais, os quais são importantes para facilitar a infiltração e a recarga dos aquíferos.

Os pontos P1 a P6, representativos dos argissolos vermelho-amarelo e dos neossolos, apresentam constituição essencialmente arenosa, com menos de 15% de argila. Geralmente, esses tipos de solos possuem alta susceptibilidade a processos erosivos. Segundo Brady (1974), Pereira (1994) e Salomão (1999), solos ricos em areia e pobres em partículas cimentantes (argila e matéria orgânica) são mais propensos à erosão, por possuírem baixa coesão e plasticidade, podendo ser facilmente transportado. Nesses solos a capacidade de retenção de água é reduzida devido o elevado percentual de macroporos (BRANDÃO et al., 2003).

Com relação aos teores de matéria orgânica, eles foram mais baixos nos pontos P1 a P6 (argissolos vermelho-amarelo e neossolos) e mais elevados nos pontos P7 a P9 (latossolos vermelho-amarelo), estes últimos localizados em áreas de solos preservados na Floresta Nacional do Araripe. De acordo com Kiehl (1979), solos de textura arenosa apresentam maior decomposição da matéria orgânica, por apresentarem condições que favorecem um maior aquecimento e uma menor proteção física, que é proporcionada pela argila. Entretanto, solos explorados e desprotegidos, mesmo com elevado teor de argila, como é o caso dos latossolos vermelho-amarelo desta área, apresentam menor teor de matéria orgânica, devido principalmente a exposição dos mesmos às intempéries (ARAÚJO, 2010).

Os maiores teores de silte encontram-se nos pontos P4 (13,8 %) e P7 (12,9 %) e os menores no ponto P3 (4,1 %). Os pontos P3 e P4 são representativos dos argissolos vermelho-amarelo e o P7 dos latossolos vermelho-amarelo. Segundo Guerra (1999) e Resende et al. (1995), quanto maior o teor de silte maior a susceptibilidade dos solos a erosão. Neste contexto, solos ricos em silte e desprovidos de cobertura vegetal têm maiores tendências ao encrostamento da superfície exposta as intempéries e ao impacto das gotas de chuvas, reduzindo a infiltração e aumentando o escoamento superficial.

Análises granulométricas realizadas por Fontenele (2010) em solos coletados no leito do riacho São José, até a profundidade de 1,40 m, apresentaram predominância de areia (variando de 70 a 95%) e foram caracterizados como arenosos e profundos. Próximo ao exutório, em áreas de menores declividades, os solos apresentaram maiores percentuais de silte e argila do que solos coletados em áreas de maior declividade e com ausência de mata ciliar.

#### 5.4. Erodibilidade do solo da bacia do riacho São José

A partir da granulometria da Tabela 11 determinaram-se as classes de estrutura dos solos como propostas na Tabela 2: classe 2 para os pontos P2 a P6 e classe 3 para P1 e P7 a P9. A partir das classes de permeabilidades proposto por ARS-USDA (1994) (Tabela 3) determinaram-se as seguintes classes: 1 para os pontos P2, P3 e P5 a P9, 2 para P1 e 3 para P4. A partir destas informações e dos percentuais de silte mais areia muito fina, areia e matéria orgânica (Tabela 11), foram determinadas as erodibilidades através da Equação 7. A Tabela 12 mostra as erodibilidades calculadas, divididas em classes de interpretação propostas por Freire e Pessoti (1978).

**Tabela 12** – Tipos de solos, erodibilidade e classificação nos pontos de amostragem da área em estudo

Tipo de solos	Amostras	Erodibilidade (ton.h.MJ <sup>-1</sup> .mm <sup>-1</sup> )	Classificação da erodibilidade
Argissolos vermelho-amarelo	P1	0,016	baixa
	P2	0,008	muito baixa
	P3	0,005	muito baixa
Neossolos	P4	0,022	baixa
	P5	0,006	muito baixa
	P6	0,005	muito baixa
Latosolos vermelho- amarelo	P7	0,004	muito baixa
	P8	0,002	muito baixa
	P9	0,002	muito baixa

De acordo com a Tabela 12, observa-se erodibilidade baixa nos pontos P1 e P4. A área do ponto P1 é constituída de argissolos vermelho-amarelo, compostos por areia franca, com alto teor de areia fina e estrutura predominante de areia média (Tabela 11). Nesta área verifica-se expansão urbana com implantação de malha viária, que deverá contribuir para o avanço de processos erosivos. A área do ponto P4 é constituída de neossolos, compostos por solos franco arenosos, com razoável teor de areia média e estrutura predominante de areia fina (Tabela 11). Nesta área há presença de atividades agroextrativistas que deixam os solos vulneráveis à erosão.

Os demais pontos apresentaram erodibilidade muito baixa. A área dos pontos P2 e P3 é constituída de argissolos vermelho-amarelo. No ponto P2 há maior predominância de areia fina, baixo teor de matéria orgânica e a classificação textural de areia franca; já no ponto P3 o solo é arenoso com baixo teor de matéria orgânica e classificação textural de areia (Tabela 11). Na área do ponto P2 encontra-se a pecuária extensiva, com solo relativamente compactado e vegetação rala, sujeito a escoamento superficial capaz de produzir processos erosivos. Nesta área foram observadas erosão do tipo voçorocas e remoção de sedimentos. A área do ponto P3 encontra-se na zona de pecuária e agricultura irrigada onde há retirada da vegetação para implantação de pastagens e para o preparo do solos agrícolas, tornando-os mais susceptíveis aos processos erosivos.

A área dos pontos P5 e P6 é constituída de neossolos. No ponto P5 há maior predominância de areia fina, baixo teor de matéria orgânica e classificação textural de areia; no ponto P6 há maior predominância de areia fina e razoável teor de areia média. Na área do ponto P5 encontra-se zona de agroextrativismo onde há presença de atividades que são favoráveis aos processos erosivos. A área do ponto P6 encontra-se na zona de encosta e não foram observados problemas ambientais.

A área dos pontos P7, P8 e P9 está localizada na Floresta Nacional do Araripe e é constituída de latossolos vermelho-amarelo. Nestes pontos há maior predominância de areia média, alto teor de matéria orgânica e classificação textural argila arenosa e franco argilo arenoso.

Conforme Lal (1988) a textura do solo é considerado um fator importante que influencia a erodibilidade por afetar os processos de desagregação e transporte, uma vez que, enquanto grandes partículas de areia resistem ao transporte, solos de textura fina (argilosos) também resistem à desagregação, sendo a areia fina e o silte as texturas mais suscetíveis à desagregação e ao transporte.

A erodibilidade tende a aumentar quando os teores de areia muito fina e silte são elevados, e a diminuir, com a elevação dos teores de argila e matéria orgânica (WISCHMEIER; SMITH, 1958). Considerando somente a granulometria, o solo será mais resistente à erosão quanto maior for a condutividade hidráulica.

### 5.5. Análise geoestatística da erodibilidade do solo

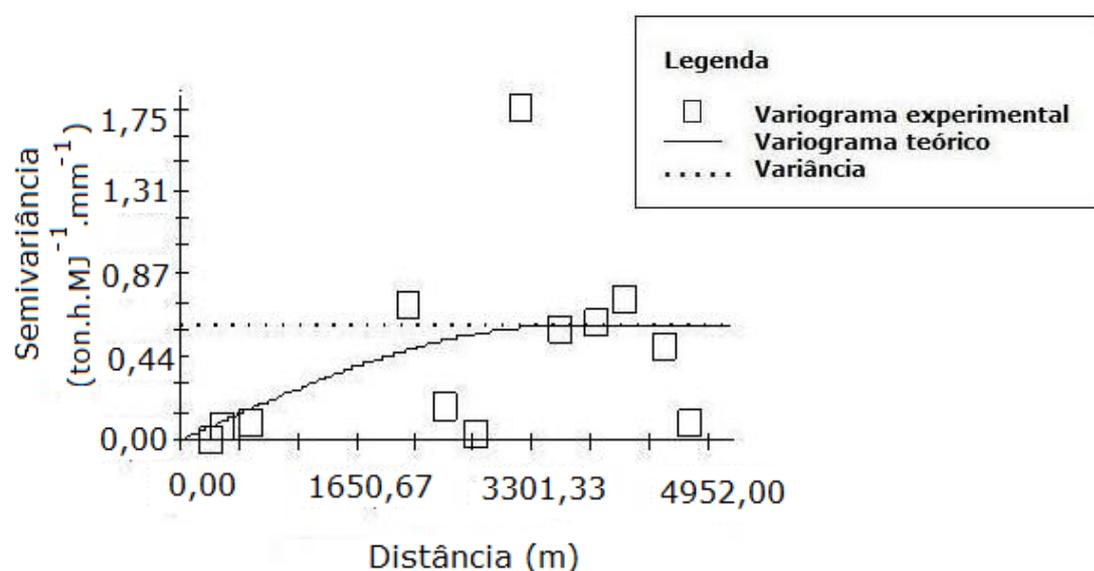
A análise geoestatística dos dados georeferenciados de erodibilidade dos solos, realizada através da variografia, utilizou três modelos teóricos: o esférico, o exponencial e o gaussiano. Os valores mínimo e máximo, a média, a variância, o coeficiente de determinação da análise de regressão e os erros quadráticos médios obtidos por meio da validação cruzada estão dispostos na Tabela 13. Através da análise destes parâmetros foi obtido o melhor modelo aplicável ao conjunto de dados em estudo.

**Tabela 13** – Estatística comparativa da modelagem geoestatística por krigagem pontual

Parâmetros analisados	Modelo			Unidade
	Esférico	Exponencial	Gaussiano	
Valor mínimo	$5,92 \times 10^{-3}$	$1,68 \times 10^{-3}$	$4,52 \times 10^{-3}$	ton.h.MJ <sup>-1</sup> .mm <sup>-1</sup>
Valor máximo	$8,43 \times 10^{-3}$	$1,42 \times 10^{-2}$	$1,23 \times 10^{-2}$	ton.h.MJ <sup>-1</sup> .mm <sup>-1</sup>
Média	$7,75 \times 10^{-3}$	$7,11 \times 10^{-3}$	$7,94 \times 10^{-3}$	ton.h.MJ <sup>-1</sup> .mm <sup>-1</sup>
Variância	$7,33 \times 10^{-7}$	$1,24 \times 10^{-5}$	$5,99 \times 10^{-6}$	ton.h.MJ <sup>-1</sup> .mm <sup>-1</sup>
Coef. de determinação (R <sup>2</sup> )	91	32	40	%
Erro quadrático médio	$5,86 \times 10^{-6}$	$8,01 \times 10^{-6}$	$6,92 \times 10^{-6}$	–

A análise estatística da Tabela 13 indica que o melhor coeficiente de determinação foi obtido para o modelo esférico, com aproximadamente 91% dos dados ajustados. Esse modelo também obteve o menor erro quadrático médio de  $5,86 \times 10^{-6}$ , indicando uma melhor estimativa. Assim, o modelo do variograma teórico esférico foi o mais indicado para estimar valores de erodibilidade através da interpolação por krigagem pontual.

O variograma apresentado para o modelo teórico esférico a partir dos dados experimentais está na Figura 29.



**Figura 29** - Variogramas dos dados de erodibilidade obtidos pelo modelo teórico esférico

Os parâmetros dos três variogramas testados estão descritos na Tabela 14.

**Tabela 14** – Modelos de variogramas e parâmetros ajustados aos dados de erodibilidade do solo

Parâmetros	Modelo		
	Esférico	Exponencial	Gaussiano
Nº de "lags"	12	12	12
Efeito pepita (ton.h.MJ <sup>-1</sup> .mm <sup>-1</sup> )	0,10	0,10	0,10
Patamar (ton.h.MJ <sup>-1</sup> .mm <sup>-1</sup> )	0,60	0,63	0,60
Alcance (m)	3610	1489	1670

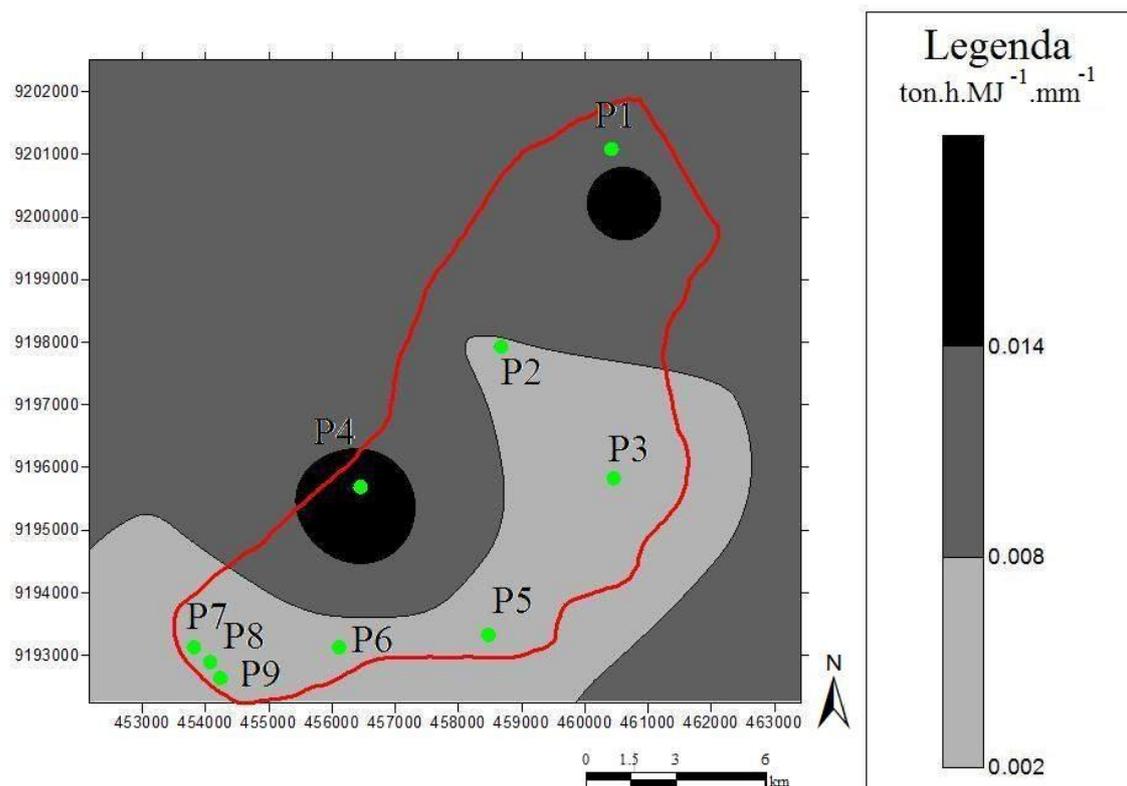
De acordo com a Tabela 14 verifica-se que os três modelos apresentaram o mesmo efeito pepita ( $0,1 \text{ ton.h.MJ}^{-1}.\text{mm}^{-1}$ ), um valor relativamente baixo, indicando que possivelmente não haverá variações significativas de erodibilidade a distâncias menores que as amostradas.

Como o patamar corresponde à variância máxima do conjunto de dados, ele é um indicativo da quantidade de variação ao acaso de um ponto para outro. Neste caso, o patamar relativamente baixo de  $0,6 \text{ ton.h.MJ}^{-1}.\text{mm}^{-1}$  indica que os valores vizinhos são mais parecidos para estes modelos.

Segundo Cambardella et al. (1994), o grau de dependência espacial pode ser classificado através da razão entre o efeito pepita e o patamar como: forte, para valores menores que 0,25; moderado, para valores entre 0,25 e 0,75; e fraco, para valores maiores que 0,75. Neste caso, de acordo com os dados da Tabela 14, todos os modelos analisados apresentam uma forte dependência espacial.

O alcance do variograma, ou raio máximo de uma circunferência hipotética onde todas as amostras apresentam-se correlacionadas espacialmente, é máximo para o modelo esférico (3.610 m), indicando que o mesmo é o mais indicado para estimar valores de erodibilidade através da interpolação por krigagem pontual, corroborando com os resultados da validação cruzada.

A representação gráfica das isolinhas de erodibilidade, geradas através de interpolação por krigagem pontual com uso do modelo esférico, está na Figura 30.

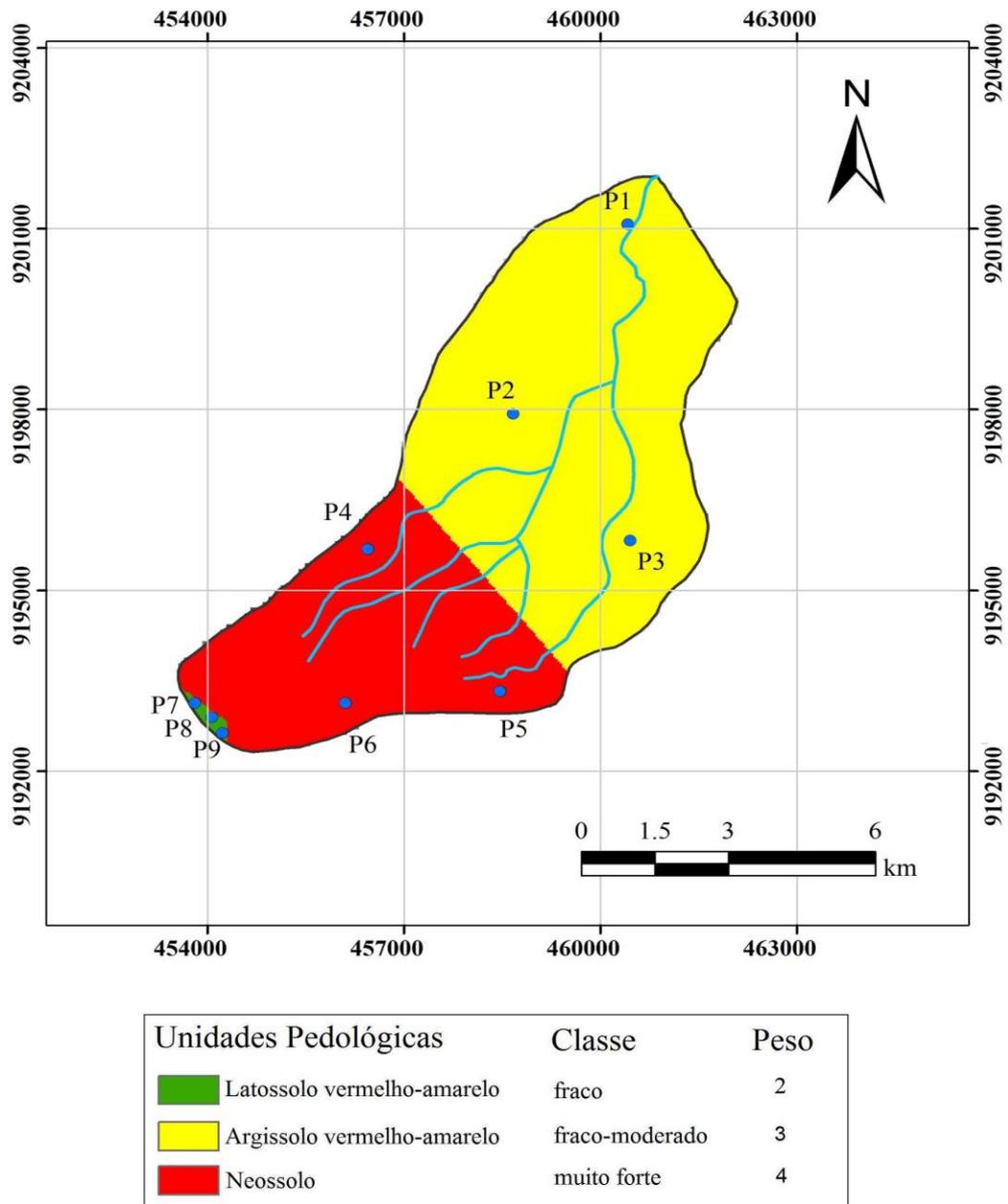


**Figura 30** - Representação gráfica das isolinhas de erodibilidade, geradas através de interpolação por krigagem pontual com uso do modelo esférico

## 5.6. Análise espacial da susceptibilidade à erosão do solo

### 5.6.1. Mapa pedológico

A Figura 31 mostra a classificação dos solos da bacia do riacho São José obtida por Funceme (2006) e os respectivos pesos em relação a erodibilidade dos mesmos, propostos por Salomão (1999) (Tabela 6).



**Figura 31** – Classes de susceptibilidade à erosão para cada tipo de solo

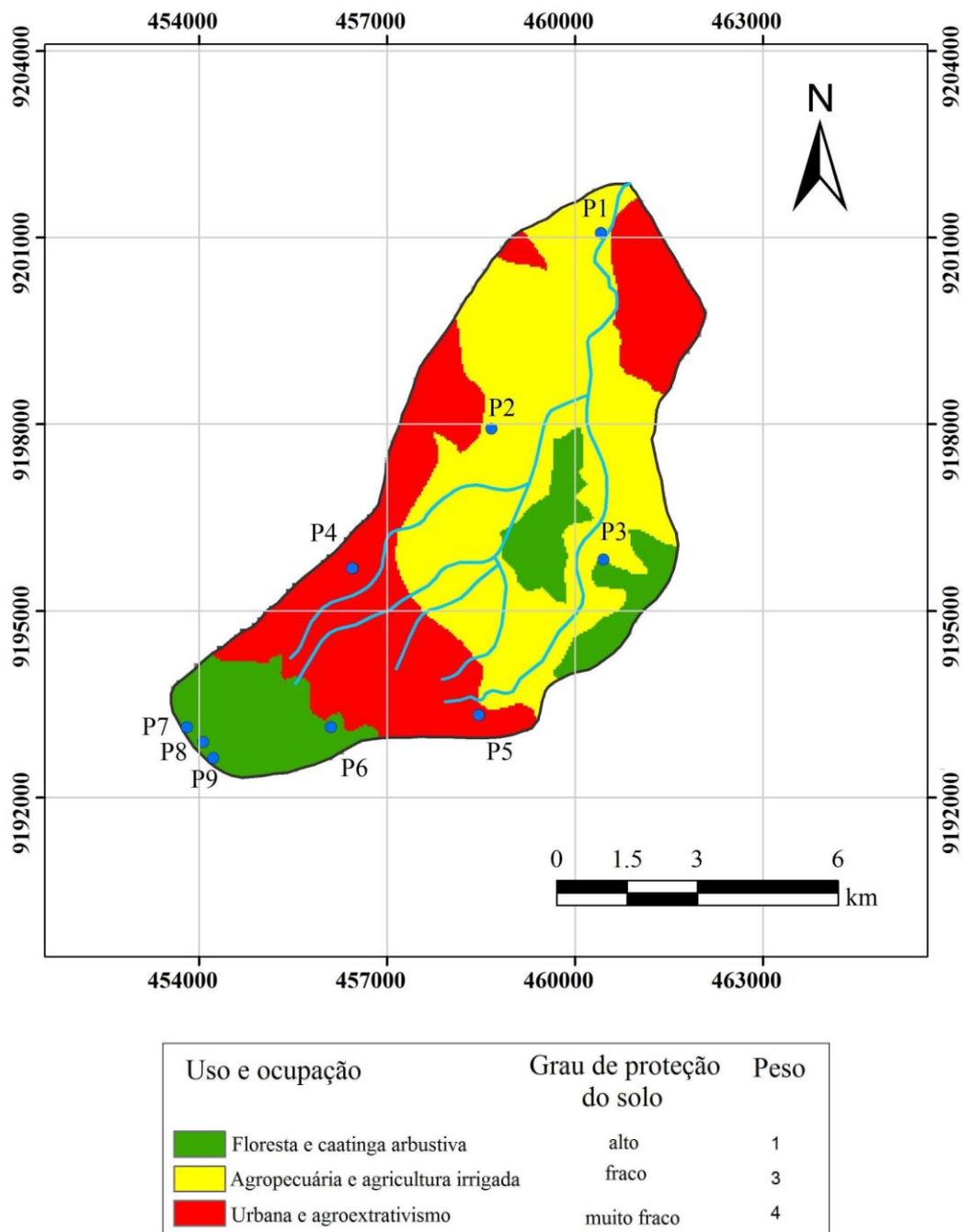
A classe de solos de susceptibilidade a erosão muito forte, representativa dos neossolos, está presente em aproximadamente 34,7% da área da bacia, em direção ao exutório. Nesta área encontra-se os pontos P4 a P6 que apresentaram perfil de textura arenosa. Se estes solos estiverem desprotegidos em áreas mais íngremes, os processos erosivos poderiam ser agravados e gerarem deslizamentos.

A classe de solos de susceptibilidade a erosão fraco-moderada está associada aos argissolos vermelho-amarelo, que está presente em aproximadamente 65% da bacia. Os pontos P1 a P3, estão localizados nestes solos e apresentam perfil de textura arenosa. Estes solos apresentam certa susceptibilidade aos processos erosivos, que serão tão mais intensos quanto maiores forem as discontinuidades texturais e estruturais em subsuperfície.

A classe de solos de fraca susceptibilidade a erosão está associada aos latossolos vermelho-amarelo, presente em apenas 0,3% da bacia. Os pontos P7 a P9, localizados nestes solos apresentam textura argila arenosa. Esta área, localizada na Floresta Nacional do Araripe, não apresenta susceptibilidade a processos erosivos.

#### 5.6.2. Mapa de uso e ocupação do solo

A Figura 32 mostra o mapa de uso e ocupação do solo na bacia do riacho São José, obtida por Funceme (2006) e os respectivos pesos em relação ao grau de proteção, proposto por Salomão (1999) (Tabela 7).



**Figura 32** – Classes de uso e ocupação do solo

De acordo com a Figura 32, as áreas de agroextrativismo e urbana apresentam muito fraco grau de proteção do solo. Nestas áreas, os processos erosivos ocorrem de forma diferenciada, nas áreas rurais o principal agravante fica a cargo do manejo inadequado dos solos, enquanto que, nas áreas urbanas predominam erosões do solo decorrentes da concentração de fluxo, principalmente em razão de deficiências do sistema de

drenagem. Os pontos P1, P4 e P5 encontram-se nestas áreas, sendo o primeiro localizado na área urbana de Juazeiro do Norte.

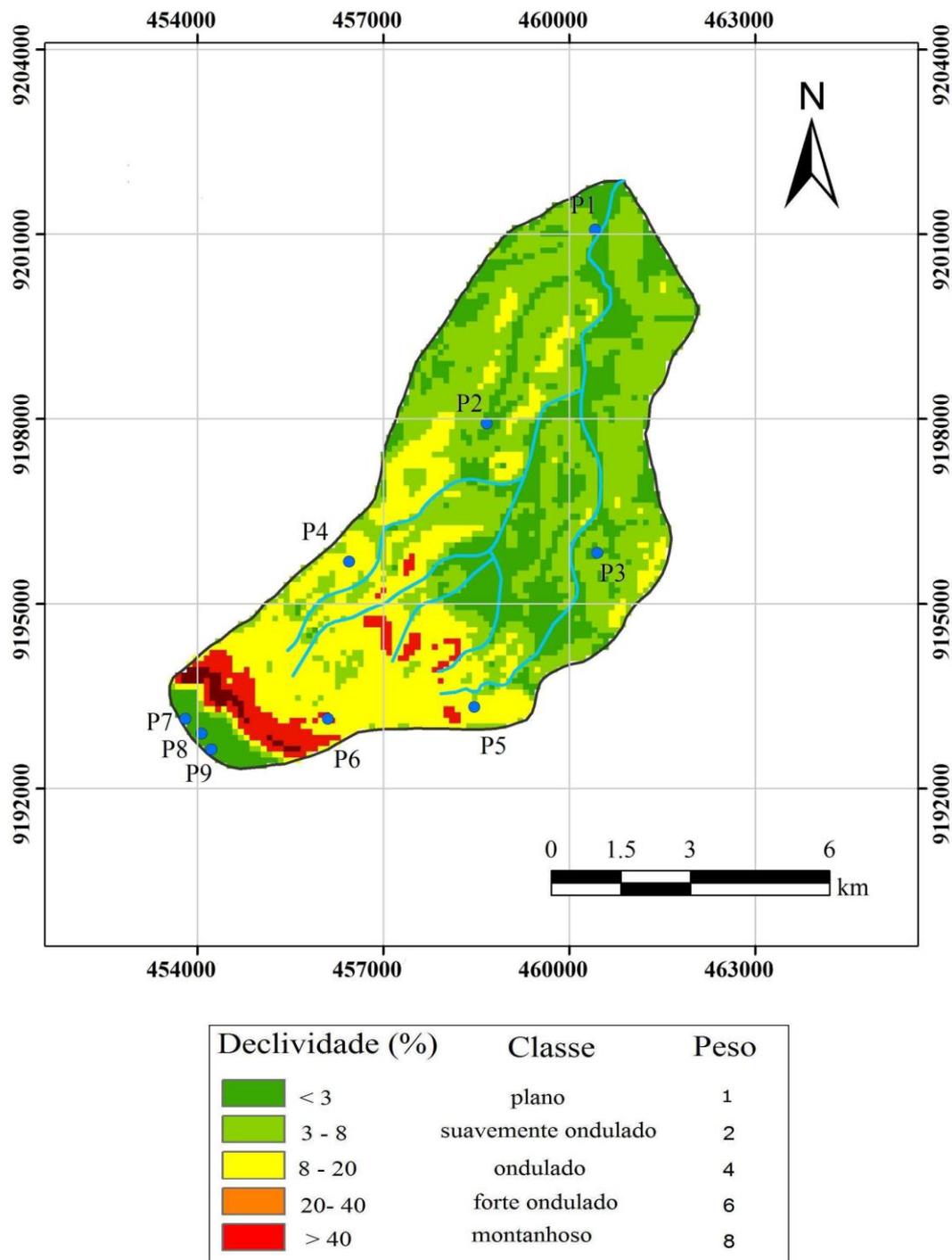
As áreas de agropecuária, pecuária e agricultura irrigada apresentam fraco grau de proteção do solo. Os pontos P2 e P3 encontram-se em áreas de agricultura e pecuária, onde é comum encontrar diversos tipos de processos erosivos, além do mais, em algumas destas áreas a cobertura vegetal é bem seca, típica do semiárido, e não são preservadas das ações antrópicas agressivas ao meio.

As áreas de floresta e caatinga arbustiva apresentam alto grau de proteção e, conseqüentemente, o menor índice de susceptibilidade à erosão. Os pontos P7 a P9 encontram-se na área de floresta e o ponto P3 na área de caatinga arbustiva.

Na bacia do riacho São José a zona urbana e o agroextrativismo ocupam 42% da área, a pecuária e agricultura irrigada ocupam 38%, enquanto que a floresta e a caatinga arbustiva ocupam 20%.

### 5.6.3. Mapa de declividade

A Figura 33 mostra o mapa de declividade da bacia do riacho São José e os respectivos pesos em relação ao relevo, conforme a definição de Ramalho Filho e Beek (1995) (Tabela 8).



**Figura 33** - Classes de declividade

De acordo com a Figura 33, 25% da bacia possui relevo plano, com declividades menores que 3%; 43% possui relevo suavemente ondulado, com declividades entre 3 e 8%; 28% possui relevo ondulado, com declividade entre 8 e 20%; 3,5% possui relevo

forte ondulado, com declividade entre 20 e 40%; e 0,5% possui relevo montanhoso, com declividades maiores que 40%. Na bacia a declividade mínima é zero, próxima ao exutório e a máxima é 63%, na encosta da Chapada do Araripe.

Os pontos P1, P2 e P7 a P9 estão localizados numa área de topografia plana; o P3 numa suavemente ondulada; os P4 e P5 numa ondulada; e o P6 numa forte ondulada.

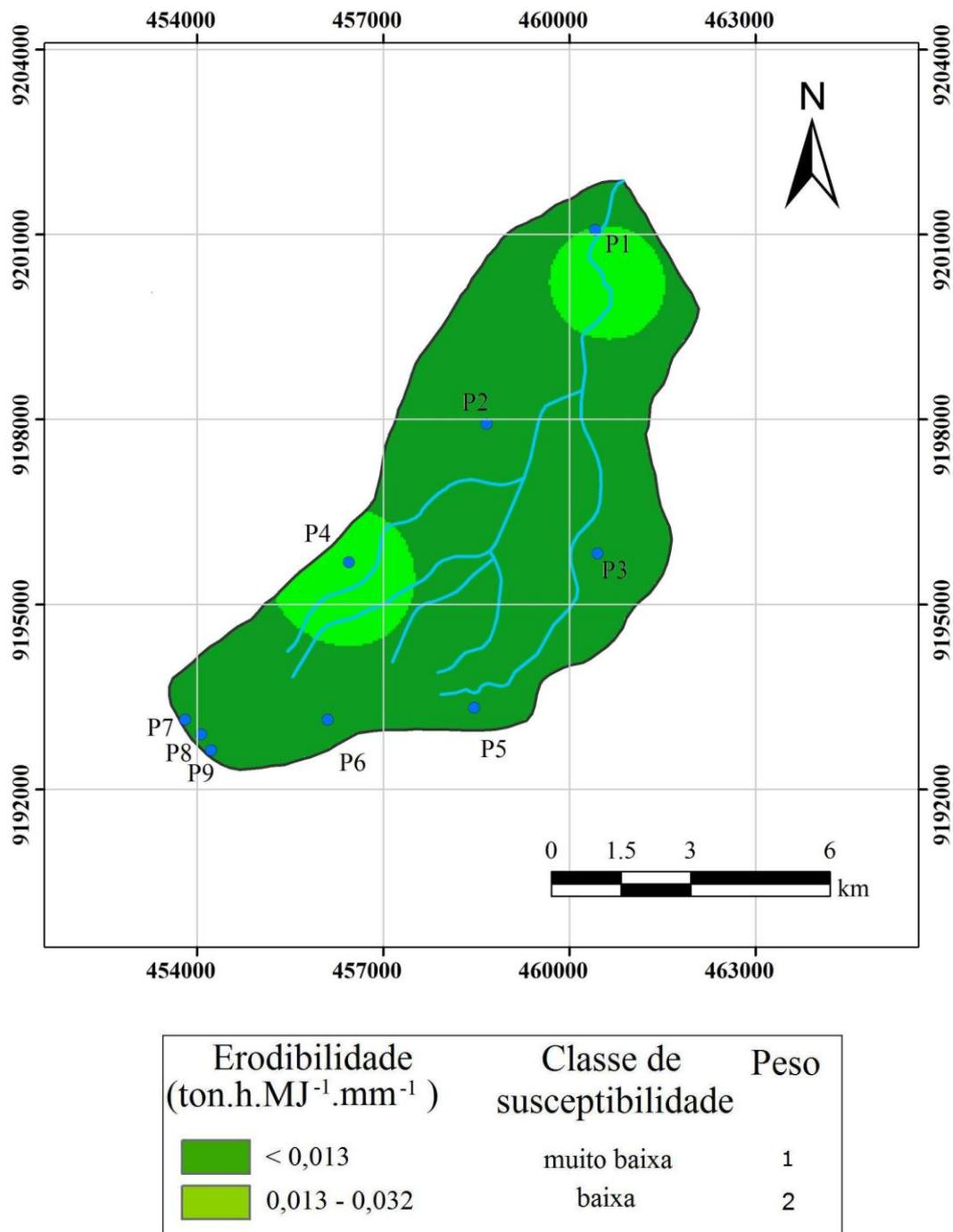
As cabeceiras da rede de drenagem se localizam nas áreas de relevo ondulado e as bordas da bacia apresentam maior parte em áreas de relevo plano e suavemente plano, exceto próximo a encosta da chapada que varia de ondulado a montanhoso.

As áreas de maiores declividades estão associadas a zonas intensamente dissecadas pela drenagem e às altitudes do relevo que variam de 385 a 957 metros. A partir destas áreas as declividades seguem diminuindo à medida que se chega ao exutório da bacia, onde se encontra a zona urbana.

A zona urbana que ocupa parte dos relevos plano e suavemente ondulado, deve apresentar velocidade média do escoamento superficial relativamente alta, devido à pequena parcela de vegetação existente, a impermeabilização do solo e ao nivelamento topográfico.

#### 5.6.4. Mapa de erodibilidade

A Figura 34 mostra o mapa de erodibilidade da bacia do riacho São José e os respectivos pesos em relação as classes de seu potencial, definidas por Freire e Pessoti (1978) (Tabela 9).



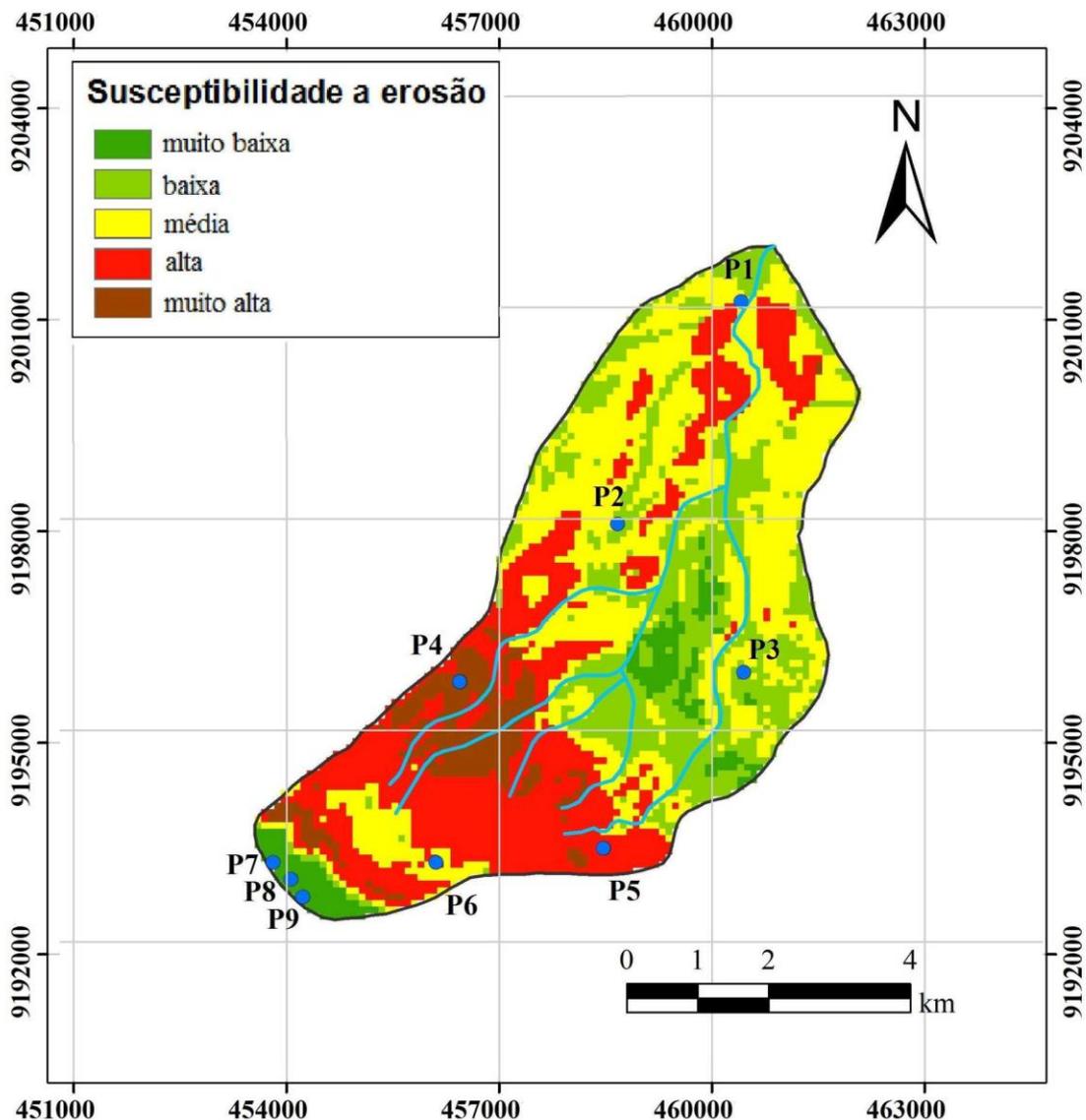
**Figura 34** – Classes de potencial a erodibilidade

De acordo com a Figura 34, na bacia do riacho São José encontram-se duas classes de potencial à erodibilidade: muito baixa, ocupando 87% da área, com erodibilidades menores que  $0,013 \text{ ton.h.MJ}^{-1}.\text{mm}^{-1}$  e baixa, ocupando 13% da área, com erodibilidades entre  $0,013$  e  $0,032 \text{ ton.h.MJ}^{-1}.\text{mm}^{-1}$ .

Os pontos P2, P3 e P5 a P9 encontram-se em áreas de solos de muito baixo potencial à erodibilidade, enquanto que os demais encontram-se em áreas de baixo potencial. Os pontos P7 a P9 encontram-se em área de floresta preservada com maior porte da vegetação, baixa densidade de drenagem e alta permeabilidade dos solos.

#### 5.6.5. Mapa de susceptibilidade à erosão dos solos

A Figura 35 mostra o mapa de susceptibilidade à erosão dos solos da bacia do riacho São José, elaborado através do cruzamento dos quatro mapas temáticos (pedológico, uso e ocupação do solo, declividade e erodibilidade).



**Figura 35** – Mapa de susceptibilidade à erosão da bacia do riacho São José

A susceptibilidade à erosão do solo, de acordo com a Figura 35, apresentou-se assim distribuída: muito baixa para 18,1% (7,2 km<sup>2</sup>) da bacia, baixa para 30% (12 km<sup>2</sup>), média para 17,2% (6,9 km<sup>2</sup>), alta para 18,5% (7,4 km<sup>2</sup>) e muito alta para 16,2% (6,5 km<sup>2</sup>) correspondendo a 40 km<sup>2</sup>.

Áreas de susceptibilidade muito alta à erosão estão localizados na zona de encosta e em área agroextrativista de neossolos, com declividades entre 8 e 40% e maiores que 60%.

Áreas de susceptibilidade alta estão localizadas, predominantemente, em zona de agroextrativismo de neossolos, com declividades entre 8 e 20%. Essas áreas de neossolos são caracterizadas como potencialmente críticas, com elevada susceptibilidade à erosão e a fenômenos geológicos, como por exemplo, possíveis movimentos de massa. Estes tipos de solos presentes em áreas íngremes podem apresentar remoção acentuada para partes mais baixas e côncavas logo após desmatamentos.

Áreas de susceptibilidade média estão localizadas, predominantemente, em zonas de pastagem e culturas perenes em argissolos vermelho-amarelo, com declividades entre 3 e 8%. A zona urbana está localizada em áreas de susceptibilidade média e alta, de declividades menores que 3%.

Áreas de susceptibilidade baixa localizam-se, predominantemente, em zonas de pecuária e agricultura irrigada em argissolos vermelho-amarelo, com declividades entre 3 e 20%.

Áreas de susceptibilidade muito baixa estão localizadas, predominantemente, em zona de floresta preservada e em uma pequena porção da caatinga arbustiva, de declividades menores que 3%. Na zona de floresta encontram-se os latossolos vermelho-amarelo. Esta área é a mais estável ambientalmente e com menor potencial a erosão, por apresentar relevo plano e solo de textura argilosa. A Tabela 15 resume os resultados obtidos.

**Tabela 15** – Classificação do grau de susceptibilidade a erosão

Característica da área	Grau de susceptibilidade a erosão				
	muito baixo	baixo	médio	alto	muito alto
Intervalo de declividade	0 a 3%	3 a 20%	3 a 8%	8 a 20%	8 a 40% e maior de 60%
Uso do solo	zona de floresta preservada e caatinga arbustiva	zonas de pecuária e agricultura irrigada	zonas de pastagem e culturas perenes	zona de agroextrativismo	zona de encosta e em área agroextrativista
Área (km <sup>2</sup> )	7,2	12	6,9	7,4	6,5
% da área	18,1	30	17,2	18,5	16,2

Neste contexto, observa-se que a fragilidade das classes muito alta à alta é expressiva na área, pois representam aproximadamente 35% da superfície da bacia. Assim, pode-se afirmar que o uso do solo da bacia em estudo está atingindo os limites de susceptibilidade ambiental, principalmente por se encontrar em uma zona de conurbação bastante sensível aos processos erosivos, cujo controle pode ser realizado a partir do zoneamento, para uso e ocupação, e da adoção de práticas conservacionistas dos solos.

## 6. CONCLUSÃO

De acordo com os parâmetros morfométricos analisados, a bacia do riacho São José é estreita, alongada e irregular (pequeno fator de forma e alto coeficiente de compacidade), indicando que há uma menor possibilidade de ocorrência de chuvas intensas cobrindo simultaneamente toda a área. Quanto ao relevo, a declividade média da bacia é menor que a do rio principal, indicando que a mesma deve apresentar escoamento superficial mais lento; e quanto à rede de drenagem, a bacia é caracterizada como medianamente drenada. Dessa forma, a bacia em estudo apresenta-se pouco suscetível a enchentes em condições normais de precipitação, ou seja, excluindo-se os eventos extremos.

No campo, observaram-se problemas ambientais mais proeminentes na zona urbana (ocasionados pela redução da capacidade de infiltração e o conseqüente aumento da velocidade do escoamento superficial) e na zona de pecuária e agricultura irrigada, onde há processos erosivos por voçoroca (ocasionados por escoamento superficial em áreas de cobertura vegetal degradada e de solos compactados).

A granulometria dos solos coletados nas zonas de agropecuária, agricultura irrigada, caatinga arbustiva e agroextrativismo apresentaram maior percentual de areia fina (máximo de 62,5 e mínimo de 43,9 %), enquanto que nas zonas urbana e de floresta o maior foi de areia média (máximo de 49,8 e mínimo de 43,0 %). Os maiores teores de silte foram encontrados em duas amostras, uma na zona de agroextrativismo (13,8 %) e outra na de floresta (12,9 %), e os menores em uma amostra na zona de agricultura irrigada (4,1 %).

Os solos da zona de floresta preservada, classificados como latossolos vermelho-amarelo, apresentaram permeabilidade elevada (máxima de 2,6 e mínima de  $2,3 \times 10^3$  mm/h) e maiores teores de matéria orgânica (máximo de 4,2 e mínimo de 3,6 %) e argila (máximo 39,3 e mínimo de 33,2 %) que nas demais zonas. Nas zonas urbana, agropecuária, agricultura irrigada e caatinga arbustiva, os solos predominantes são dos tipos argissolos vermelho-amarelo; e na zona de agroextrativismo, dos tipos neossolos.

Os solos da zona urbana apresentaram permeabilidade moderada a alta ( $9,0 \times 10^2$  mm/h) e nas demais, rápida (máxima de  $1,4 \times 10^3$  e mínima de 41 mm/h).

Os solos das diferentes zonas foram classificados como de muito baixa erodibilidade (máxima de 0,008 e mínima de  $0,002 \text{ ton.h.MJ}^{-1}.\text{mm}^{-1}$ ), com exceção de duas amostras: uma da zona urbana e outra da de agroextrativismo, que foram classificados como baixa ( $0,016$  e  $0,022 \text{ ton.h.MJ}^{-1}.\text{mm}^{-1}$ , respectivamente). Os menores índices de erodibilidade foram encontrados na zona de floresta (máxima de 0,004 e mínima de  $0,002 \text{ ton.h.MJ}^{-1}.\text{mm}^{-1}$ ), onde se encontra a Floresta Nacional do Araripe, constituída de latossolos vermelho-amarelo. Nestes pontos há maior predominância de areia média, alto teor de matéria orgânica e solos de classificação textural argila arenosa e franco argilo arenoso.

A análise geoestatística, utilizada na escolha do modelo de estimativa de valores de erodibilidade através da interpolação por krigagem pontual, considerou o modelo teórico esférico como de melhor ajuste ao variograma experimental, com menores coeficiente de determinação (91%) e erro quadrático médio ( $5,86 \times 10^{-6}$ ). Esta conclusão também foi obtida através da análise dos parâmetros do variograma (efeito pepita, patamar e alcance).

Foram elaborados quatro mapas temáticos: pedológico, uso e ocupação do solo, declividade e erodibilidade. Os dois primeiros obtidos da Funceme (2006), o terceiro através do Modelo Numérico do Terreno e o quarto através da interpolação por krigagem pontual, utilizando o modelo teórico esférico. Cada mapa apresentou zonas onde foram atribuídos pesos específicos. O cruzamento desses quatro mapas temáticos, utilizando linguagens e operadores de álgebra de mapas, resultou no mapa de susceptibilidadesusceptibilidade à erosão dos solos, distribuídas em cinco zonas: muito alta (correspondendo a 16,2% da área) e alta (18,5%), localizadas, predominantemente, na encosta e em área agroextrativista de neossolos; média (17,2%), em áreas de pastagem e culturas perenes em argissolos vermelho-amarelo; baixa (30%), em áreas de agricultura irrigada e caatinga arbustiva em argissolos vermelho-amarelo; muito baixa (18,1%), em área de floresta preservada em latossolos vermelho-amarelo e em uma pequena porção da caatinga arbustiva em argissolos vermelho-amarelo. A área urbana

localiza-se em zonas de susceptibilidade média e alta, mostrando que a ação antrópica tem forte relação com os processos modificadores da paisagem.

Como 35% da bacia é marcada por zonas de susceptibilidade muito alta à alta, observa-se que o uso do solo está próximo a atingir os limites de susceptibilidadesusceptibilidade ambiental, principalmente por se encontrar em uma zona de conurbação bastante sensível aos processos erosivos, cujo controle pode ser realizado a partir do zoneamento, para uso e ocupação, e da adoção de práticas conservacionistas dos solos.

A análise da susceptibilidadesusceptibilidade ambiental representou um importante instrumento do planejamento ambiental, pois identificou áreas prioritárias para um manejo conservacionista dentro da perspectiva de reduzir problemas erosivos. Os resultados obtidos da geração dos mapas de susceptibilidade à erosão do solo mostraram a necessidade de um planejamento do uso e ocupação do solo na área.

## REFERÊNCIAS

ALBUQUERQUE, A.W.; LOMBARDI NETO, F.; SRINIVASAN, V.S.; SANTOS, J.R. **Manejo da cobertura do solo e de práticas conservacionistas nas perdas de solo e água em Sumé, PB.** R. Bras. Eng. Agric. Amb., p.136-141, 2002.

ALCANTARA, E.H.; AMORIM, A.J. **Análise morfométrica de uma bacia hidrográfica costeira: um estudo de caso.** Caminhos da Geografia, Uberlândia-MG p.70-77, 2005.

ALENCAR et. al. **Florística e Fitossociologia de uma Área de Cerradão na Chapada do Araripe - Crato - CE.** Revista Brasileira de Biociências, Porto Alegre, v. 5, supl. 2 p. 18-20, jul. 2007 ambiental. 3.ed. Madrid, Ediciones Mundi-Prensa, 412p. 1997.

AQUINO, D. N. et al. **A aplicação da USLE e SIG na estimativa da perda de solos em uma micro bacia hidrográfica do semi-árido do estado do ceará.** In: Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola, Bonito, MS: Acqua Consultoria, 2007.

ARAÚJO, A. O. **Avaliação de propriedades físicas dos solos e da macrofauna edáfica em áreas submetidas a manejo Florestal de vegetação nativa na chapada do araripe.** Dissertação de mestrado - Programa de Pós Graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2010.

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

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

BANDEIRA, A. P. N. **Mapa de risco de erosão e escorregamento das encostas com ocupações desordenadas no Município de Camaragibe - PE.** Centro de tecnologia e geociências (Tese de doutorado), Recife – PE, 2003 .

BASIC et al. **Tillage and crop management effects on soil erosion in central Croatia.** Soil & Tillage Research, v.78, p. 197–206, 2004. Bertoni, J.; Lombardi Neto, F. Conservação do solo. 5a ed. Sao Paulo: Icone, 355p. 2005.

BECKETT, P. H. T.; WEBSTER, R. **Soil variability: a review.** Soil Fertility, Toronto, v.34, n.1, p.1-15, 1971.

BENDA, F.; ALVES, M. da G.; CORREA, F.de P. **Carta de potencial à erosão laminar utilizando sistema de informação geográfica”** In: Anais XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Florianópolis, INPE. Brasil, 2007.

- BERRY, J.K. **Cartographic modeling: the analytical capabilities of GIS.** In: GOODCHILD, M; PARKS, B.O.; STEYAERT, L.T. (ed.) 1993. Environmental modelling with GIS. New York, Oxford University Press. cap.7, p.59-73. 1993.
- BERTOL, I.; SCHICK, J.; BATISTELA, O.; LEITE, D.; AMARAL, A.J. **Erodibilidade de um Cambissolo Húmico alumínico léptico, determinada sob chuva natural entre 1989 e 1998 em Lages (SC).** R. Bras. Ci. Solo, v.26, n.2, p.465-471, 2002.
- BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. **Conservação do solo.** São Paulo - SP. Ícone, 355p. 1990.
- BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. **Conservação do solo.** São Paulo: Ícone, 1999.
- BIGARELLA, J.J. **Estrutura e origem das paisagens tropicais e subtropicais.** Ed. UFSC, Florianópolis, p. 550, 2003.
- BOTELHO, R. G. M.; SILVA, A. S. **Bacia hidrográfica e qualidade ambiental.** In: VITTE, A. C.; GUERRA, A. J. T. (org). Reflexões sobre a Geografia Física no Brasil. Ri de Janeiro, Bertrand Brasil. 2004.
- BRADY, N. C. **The Nature and Properties of Soils.** 8a ed. Macmillan Publishing CO., Inc., New York. 1974.
- BRANCO, S. M.; ROCHA, A. A. **Elementos de Ciências do Ambiente.** CETESB / São Paulo, SP, 1987.
- BRANDÃO, V. S.; PRUSKI, F.F.; SILVA, D.D.da. **Infiltração da água no solo.** Viçosa: UFV, 98 p. 2003.
- BRASIL. Lei da Política Nacional do Meio Ambiente. Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/Leis/L6938.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/Leis/L6938.htm)>. Acesso em: 28 set. 2010.
- CALIJURI, M.; BUBEL, A. P. M.. **Conceituação de microbacias.** In: LIMA, Walter de Paula; ZAKIA, Maria José Brito (org). As florestas plantadas e a água: Implementando o conceito de microbacia hidrográfica como unidade de planejamento. Rima, São Carlos. 2006.
- CAMBARDELLA, C. A. et al. **Fielscale variability of soils properties in central Iowa, Soils.** Soil Science Society of American Journal, Madison, v.58, p.1501-1511, 1994.
- CARDOSO, C. B. **Mapeamento das Unidades Geomorfológicas e os Impactos Ambientais: Bacias Hidrográficas do Arroio São João e Sanga da Divisa, Alegrete – RS.** 2002, 75 pgs.(Monografia de conclusão de curso), Santa Maria: UFSM, 2002.

CEARÁ. **Implantação do sistema de monitoramento/gestão de uma área piloto do aquífero Missão Velha, na Bacia Sedimentar do Araripe.** Relatório final do projeto. Fortaleza, 2005.

CHENG, J.D., Lin, L.L. e Lu, H. S. **Influence of forests on water flows from headwater watersheds in Taiwan.** Forest Ecology and Management, 165: 11-28. 2002.

CHRISTOFOLETTI, A. **Geomorfologia.** São Paulo: Edgard Blucher, 1974.

COGO, N. P.; LEVIEN, R.; SCHWARZ, R. A. **Perdas de solo e água por erosão hídrica influenciadas por métodos de preparo, classes de declive e níveis de fertilidade do solo.** Revista Brasileira de Ciência do Solo, v.27, p.743-753, 2003.

CONAMA. **Resolução nº 001/86.** Brasília. 1986.

CRÓSTA, A.P. **Processamento digital de imagens de sensoriamento remoto.** Campinas, Universidade de Campinas, 170p. 1992.

CUNHA, M.A. **Ocupação de Encostas.** São Paulo: IPT, Publicação n.º 1831, 1991.

CUNHA, M.R.; M. S. M., MARTINS, J. S., SOUSA, J. L. R., TORRES, A. J. **Análise morfométrica e diagnóstico ambiental da microbacia do córrego Limo em Uberaba – MG.** UberlândiaMG, Sociedade & Natureza, n.26, p.31 36, abril/2007.

CUNHA, P. **Superfície geomórfica e variabilidade de Latossolos em uma vertente sobre arenito-basalto em Jaboticabal, SP.** (Tese de Doutorado) Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal - SP, 149p. 2000.

DIAS, J.E. **Análise Ambiental por Geoprocessamento do Município de Volta Redonda.** Dissertação (Mestrado Ciências Ambientais e Florestais) - Instituto de Florestas. Universidade Federal Rural, Rio de Janeiro, 180p.1999.

DIEPEN, C.A.; KEULEN, H.; WOLF, J. & BERKHOUT, A.A. **Land Evaluation: from intuition to quantification.** Adv. Soil Sci., 15:140-204, 1991.

DNPM. **Projeto Avaliação Hidrogeológica da Bacia Sedimentar do Araripe.** Recife, 18-19p. 1996.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA CENTRO NACIONAL DE PESQUISAS DE SOLOS. **Manual de métodos de análises de solo.** 2 ed. Rio de Janeiro, p. 212, 1997.

FDEZ.-VÍTORA, V.C. **Guia metodologica para la evaluacion del impacto ambiental.** 3.ed. Madrid, Ediciones Mundi-Prensa, Bilbao: Grafo, S.A., 412p. 1997.

FERNANDES et al. **Mapa de risco de erosão o e contaminação superficial da microbacia do correjo samambaia.** Goiânia, v. 34, n.11/12, 2007.

FONTENELE, S. B. **Modelagem matemática da dinâmica de fluxo riacho-aquífero na microbacia hidrográfica do riacho São José, região do Cariri cearense.** Dissertação de mestrado - Programa de Pós Graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2010.

FORMAGGIO, A.R.; ALVES, S.D.; EPIPHANIO, J.C.N. **Sistemas de informações geográficas na obtenção de mapas de aptidão agrícola e de taxa de adequação de uso das terras.** R. Bras. Ci. Solo, 16:249-256, 1992.

FOSTER, G.R.; McCOLL, D.K.; RENARD, K.G.; MOLDENHAUER, W.C., **Conversion of the Universal Soil Loss Equation to SI metric units.** nov-dez. 1981.

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.

FUNCEME. **Zoneamento Geoambiental do Estado do Ceará.** Parte II – Messorregião do Sul Cearense. Fortaleza – CE, 2006

FUNCEME – Fundação Cearense de Meteorologia e recursos Hídricos. **Séries Históricas.** Disponível em: <<http://www.funceme.br>> Acesso em 05 de jan 2011.

GOBBI, A.F.; TORRES, J.L.R.; FABIAN, A.J. **Diagnóstico ambiental da microbacia do córrego do Melo em UberabaMG.** Caminhos de Geografia, Uberlândia v.9, n.26, p.223, Jun/2008.

GUERRA, A. J. T. **Processos Erosivos Nas Encostas.** In: Geomorfologia: uma atualização de bases e conceitos. Orgs.: A. J. T. GUERRA, S. B.; CUNHA. 3a ed. Bertrand Brasil, Rio de Janeiro, 149-199p. 1999.

GUERRA, A. J. T.; CUNHA, S. B. **Geomorfologia: Uma Atualização de Bases e Conceitos.** Editora Bertrand Brasil, Rio de Janeiro, 1995.

GUERRA, A.J.T.; CUNHA, S. B. Degradação ambiental. In: CUNHA, S. B. **Geomorfologia e meio ambiente.** Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1996. p. 337-339.

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.

HORTON, R. **Erosional development of streams and their drainage basins: hydrophysical approach to quantitative morphology.** New York: Geological Society of American Bulletin, 1945. v.56. p. 807-813.

IPECE – Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Ceará, **Perfil Básico Municipal.** Disponível em: <<http://www.ipece.ce.gov.br>> Acesso: Maio/2010.

JIMENEZ-RUEDA, J.R. et al. **Proposta Metodológica para determinar o potencial de erodibilidade a partir da análise tectônica em sensores remotos.** In: Simposio

Internacional en Percepcion Remota y Sistemas de Informacion Geografia, n. 12, 2006, Cartagena. Anais: XII Simpósio Internacional en Percepción Remota y Sistemas de Información Geográfica, 2006.

KIEHL, E.J. **Manual de edafologia: relação solo-planta**. São Paulo: Agronômica Ceres, p. 264, 1979.

KUHN, N.J.; BRYAN, R.B. **Drying, soil surface condition and interrill erosion on two Ontario soils**. Catena, 57:113- 133, 2004.

LAL, R. **Soil erosion in the tropics - principles and management**. McGraw-Hill, 1990.

LAL, R. **Soil erosion by wind and water: Problems and prospects**. In: LAL, R., ed. Soil erosion and research methods. Wageningen, SWCS. p.1-6. 1988.

LANA, C. E.; ALVES, J. M. de P.; CASTRO, P.T.A. **Análise Morfométrica da Bacia do Rio do Tanque, MG**. REM. Vol 54, p.121-126. Ouro Preto-MG, 2001.

LATRUBESSE, E. M.; STEVAUX, J. C.; SINHA, R. Tropical rivers. **Geomorphology**, v.70, n. 3-4, p.187-206, 2005.

LIMA NETO, R. T. **Análise morfométrica e ambiental da microbacia hidrográfica do rio Granjeiro, Crato/CE**. REM: R. Esc. Minas, Ouro Preto, jul. set. 2008.

LIMA, E. R. V. **Erosão do solo: fatores condicionantes e modelagem matemática**. universidade federal da paraíba laboratório e oficina de geografia da paraíba. Departamento de geociências. Revista cadernos do logepa – série pesquisa ano 1, número 1 - jan/jun de 2003 - issn 1677-111. João pessoa - PB.

LIMA, W.; ZAKIA, M. J. B. **Saúde ambiental da microbacia**. In: LIMA, Walter de Paula; ZAKIA, Maria José Brito (org). As florestas plantadas e a água: Implementando o conceito de microbacia hidrográfica como unidade de planejamento. Rima, São Carlos. 2006.

LIMA, W.P. **Princípios de hidrologia florestal para o manejo de bacias hidrográficas**. São Paulo: Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", 1986. 242p.

LLOPIS TRILLO, G. **Control de la erosión y obras de desagüe – Manual de Estabilización y Revegetación de Taludes**. Entorno Grafico S. L., Madri, 1999.

LOMBARDI NETO, F.; BERTONI, J. **Tolerância de perdas de terra para solos do estado de São Paulo**. Campinas, Instituto Agrônomo, (Boletim Técnico). 1975.12p.

MANNIGEL et al. **Fator erodibilidade e tolerância de perda dos solos do Estado de São Paulo**. Universidade Estadual Paulista. Maringá - SP, v. 24, n. 5, p. 1335-1340, 2002.

MARQUES, R. L. M. **Documento referencial do pólo de desenvolvimento integrado cariri cearense**. Banco do Nordeste. Fortaleza, 2001.

MATI, B.M.; MORGAN, R.P.C.; GICHUKI, F.N.; QUINTON, J.N.; BREWER, T.R.; LINIGER, H.P. **Assessment of erosion hazard with the USLE and GIS: A case study of the Upper Ewaso Ng'iro North basin of Kenya**. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. v. 2, n.2, p. 78-86, 2000.

MATTOS, J.T. et al. **Critérios para mapeamento de classes a erosão de solos em imagem TM-Landsat**. In: Simposio Latinoamericano de Percepção Remota, n. 9, 2002, Cochabamba. Anais IX Simpósio Latinoamericano de Percepção Remota. Cochabamba: SELPER, 2002.

MOTA, S. **Introdução à Engenharia Ambiental**. Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental - ABES, Rio de Janeiro, RJ, pp 81 – 88, 1997.

NAGHETTINI, M. **Mananciais superficiais: aspectos quantitativos**. In HELLER, Léo; PÁDUA, Valter Lúcio de. Abastecimento de água para consumo humano. Editora UFMG. 2006.

NEARING, M.A.; NORTON, D.L.; ZHANG, X. **Soil erosion and sedimentation**. In: RITTER, W.F.; SHIRMOHAMMADI, A. (Eds.). Agricultural nonpoint source pollution. Boca Raton: Lewis Publishers, p.29-58, 2001.

OLIVEIRA, J. R. et al. **Erosão hídrica em um Argissolo Vermelho-Amarelo, sob diferentes padrões de chuva simulada**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental v.14, n.2, p.140–147, Campina Grande - PB, 2010.

OOST, K. V.; GOVERS, G.; DESMET, P. **Evaluating the effects of changes in landscape structure on soil erosion by water and tillage**. Land. Eco., 15:577-589, 2000.

OVALLES, F.; REY, J. **Variabilidad interna de unidades de fertilidad en suelos de la depresión del Lago de Valencia**. Agron. Trop., 44:41-65, 1994.

PEREIRA, V. P., FERREIRA, M. E. e CRUZ, M. C. P. **Solos altamente suscetíveis à erosão**. Jaboticabal, FCAV - UNESP/SBCS, 253p. 1994.

PINTO, S. A. F. **Sensoriamento remoto e integração de dados aplicados no estudo da erosão dos solos**. Tese de Doutorado – USP, 1991.

PIRES, J. S. R.; SANTOS, J. E.; DEL PRETTE, M. E. **A utilização do conceito de Bacia Hidrográfica para conservação dos recursos naturais**. In: SCHIAVETTI, Alexandre; CAMARGO, Antonio Fernando Monteiro (org). Conceitos de Bacias Hidrográficas: teorias e aplicações. Ilhéus, Ba. Editus, 2002.

PISSARRA, T.C.T.; POLITANO, W.; FERRAUDO, A. S. **Avaliação de características morfométricas na relação solosuperfície da bacia hidrográfica do**

**córrego rico, Jaboticabal (SP).** Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 28, p. 297305, 2004.

POCAY, V.G. **Relações entre pedoforma e variabilidade espacial de atributos de Latossolos sob cultivo de cana-de-açúcar.** (Tese de Mestrado), Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 177p. 2000.

RAMALHO FILHO, A.; BEEK, K. J. **Sistema de avaliação da aptidão agrícola das terras.** 3.a ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA-CNPS, 65p. 1995.

RENSCHLER, C.S.; HARBOR, J. **Soil erosion assessment tools from point to regional scales-the role of geomorphologists in land management research and implementation.** Geomorphology, v.47, p.189–209, 2002.

RESENDE, M. **Aplicações de conhecimentos pedológicos à conservação de solos.** Informe Agropecuário, v.11, n.128, p.27-37, 1995.

RIGHETTO, A. M. **Hidrologia e Recursos Hídricos.** São Carlos, SP. ESC/USP. 840 p. 1998.

ROCHA, C. H. B. **Geoprocessamento: tecnologia transdisciplinar.** Juiz de Fora, MG. 2000.

ROSS, J. L. S. **Análise Empírica da Fragilidade dos Ambientes Naturais e Antropizados.** Revista do Departamento de Geografia. São Paulo: FFLCH/USP, n. 8, 1994.

SALOMÃO, F. X. T. **Controle e prevenção dos processos erosivos.** In: Guerra, A. J. T., Silva, A. S. & Borello, R. G. M (Org.). Erosão e conservação dos solos: conceitos temas e aplicações. p.229-267. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1999.

SCHIETTECATTE, W. et al. **Influence of landuse on soil erosion risk in the Cuyaguaje watershed (Cuba).** Catena, v.74, p.1-12, 2008.

SHOPLEY, J.B. e FUGGLE, R.F. **A comprehensive review of current environmental impact assessment methods and techniques.** Journal of Environmental Management, 18: 25-47, 1984.

SILVA JÚNIOR, A. N. **Uso da krigagem para caracterização da variabilidade espacial da condutividade hidráulica no semi-árida nordestino com enfoque bayesiano.** 2006 Dissertação (Mestrado em Biometria) – Programa de Pós Graduação em Biometria, Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, 2006.

SILVA, J.R.C.; DEGLORIA, S.D.; PHILIPSON, W.R.; McNEIL, R.J. **Estudo da mudança de uso da terra através de um sistema de análise georreferenciada.** R. Bras. Ci. Solo, 17:451-457, 1993.

SILVEIRA, A.L.L. **Ciclo hidrológico e bacia hidrográfica.** In: TUCCI, C.E.M. (Org.). **Hidrologia: ciência e aplicação.** São Paulo: EDUSP, p 35-51, 2001.

SNADDON, C. D.; WISHART, M. J.; DAVIES, B. R. **Some implications of interbasin water transfer for river ecosystem functioning and water resources management in southern Africa.** Aquatic Ecosystem Health and Management, v. 1, n. 2, p. 159-182, 1998.

SOUZA, C.G., et al. **Caracterização e manejo integrado de bacias hidrográficas.** Belo Horizonte: EMATER, 124p. 2002.

SRTM (**Shuttle Radar Topography Mission**), NASA. Disponível em: <www.srtm.usgs.gov>. Acesso em: 16 jun. 2010.

STRAHLER, A. N. **Quantitative analysis of watershed geomorphology.** Transactions of American Geophysical Union. New Haven, v. 38. p 913-920. 1957.

SUGUIO, K. **Erosão, Transporte e Deposição de Sedimentos.** In: Suguio, K. **Geologia Sedimentar.** São Paulo: Edgard Blücher, Cap.3, p. 23-42. 2003.

TEIXEIRA GUERRA, A. J.; CUNHA, S, B. **Geomorfologia: Uma atualização de bases e conceitos.** 7º Ed. Rio de Janeiro. Bertrand Brasil, 472p. 2007.

THORNES, J. B. **Vegetation and Erosion – Processes and Environments.** John Wiley & Sons Ed., Baffins Lane – Chichester, England, 1990.

TOMLIN, C. D. **Geographic information systems and cartographic modeling.** Prentice Hall, New Jersey, 249p. 1990.

TONELLO, K. C. et al. **Morfometria da Bacia Hidrográfica da Cacheira das Pombas, Guanhões – MG.** Revista Árvore. Viçosa – MG, v. 30, n. 5, p. 849-857. 2006.

TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: Ciência e Aplicação.** Editora da UFRGS e EDUSP ABRH, 952p. 1993.

TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: ciência e aplicação.** Porto Alegre: FRGS/Edusp/ABRH, 943p. 2001.

VALÉRIO FILHO, M; ARAÚJO JUNIOR, G. J. L. **Técnicas de Geoprocessamento e Modelagem Aplicadas no Monitoramento de Áreas Submetidas aos Processos Erosão do Solo.** In: 5º Simpósio Nacional de Controle de Erosão. Bauru-SP, p. 279-82. 1995.

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

VITTE, A. C. **Metodologia para cálculo de perdas de solo em bacias de drenagem.** Bol. Par. de Geoc., Curitiba, n. 45, p. 59-65, 1997.

VITTE, A. C.; MELLO, J. P. **Considerações sobre a erodibilidade dos solos e a erosividade das chuvas e suas conseqüências na morfogênese das vertentes: um balanço bibliográfico.** Climatologia e Estudos da Paisagem Rio Claro - Vol.2 - p. 107, 2007.

VITTE, A. C.; VILELA FILHO, L. R. **Estimativa de perdas de solos em uma bacia hidrográfica sob o cultivo de frutíferas, no município de valinhos.** Departamento de Geografia. São Paulo, 2006.

WANG, G.; FANG, S.; SHINKAVERA, S.; GERTNER, G.; ANDERSON, A. **Spatial uncertainty in prediction of the topographical factor for the resided universal soil loss equation (RUSLE).** Transactions of the ASAE, St. Joseph, v.45, n.1, p.109-18, 2002.

WISCHMEIER, W. H.; SMITH, D. D. **Rainfall energy and its relationship to soil loss.** Transactions of the American Geophysical Union, Washington, v. 39, n. 2, p. 285-291, 1958.

WISCHMEIER, W.H.; JOHNSON, C.B.; CROSS, B.V.A. **Soil erodibility norm graph for farmland and construction sites.** Journal of Soil and Water Conservation, 26: 189-193. 1971.

WISCHMEIER, W.H.; SMITH, D.D. **Predicting rainfall erosion losses from cropland east of the Rocky Mountains: guide selection of practices for soil and water conservation.** Washington, DC.: USDA, 1965.

WISCHMEIER, W.H.; SMITH, D.D. **Predicting rainfall erosion losses; a guide to consevation planning.** U.S. Departament of Agriculture, Washington, D.C. 58p. 1978.

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).

XAVIER, F. V.; CUNHA, K. L.; SILVEIRA, A. **Análise do risco à erosão em contribuição aos processos de conservação do solo na bacia hidrográfica do rio quilombo, chapada dos Guimarães.** XVII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Mato Grosso - MT, 2007.

ZHANG, X.; SHAO, M.; Li, S.; PENG, K. **A review of soil and water conservation in China.** Journal of Geographical Sciences, v.14, n.3, p. 259-274, 2004.