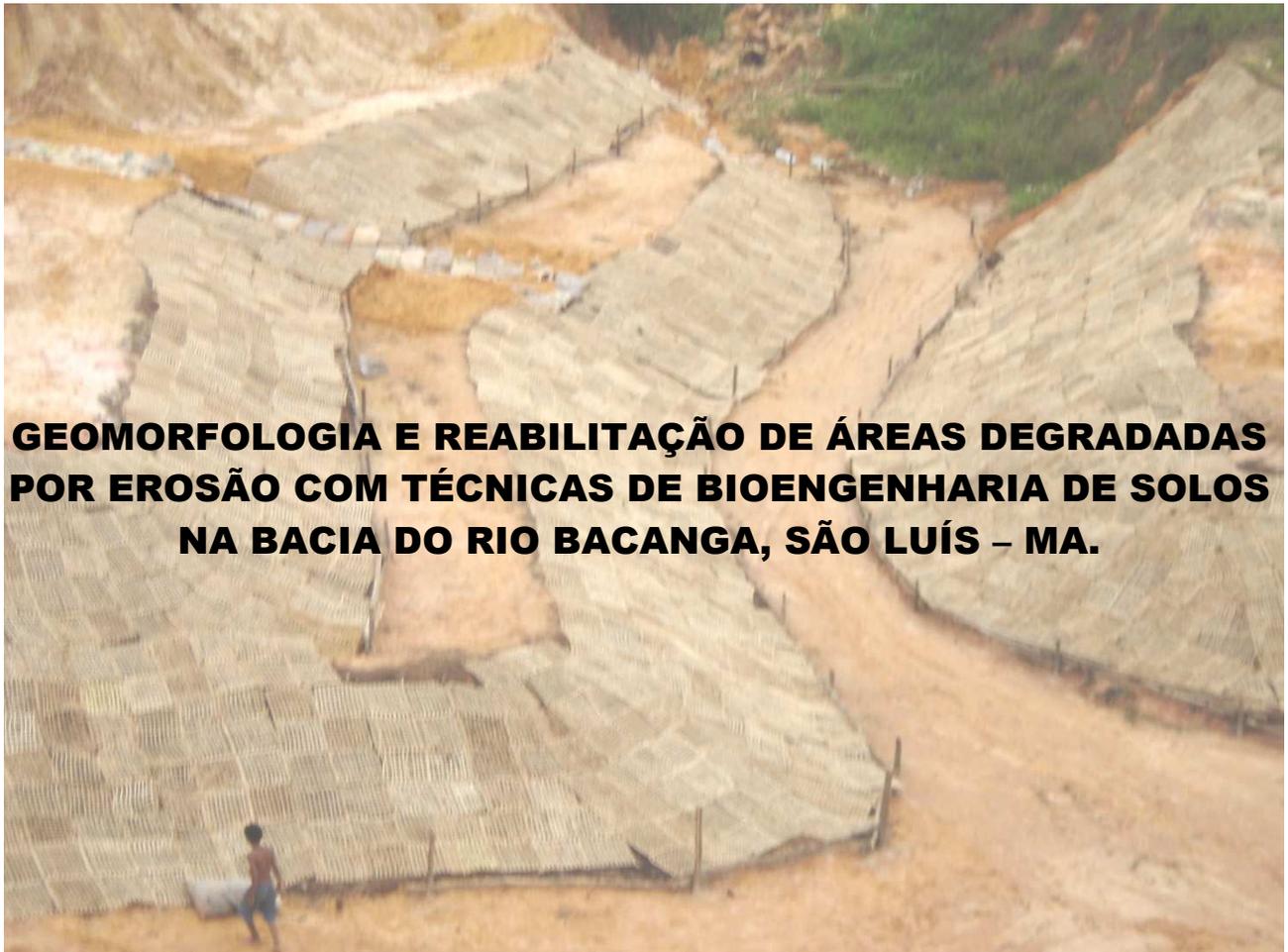




**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO**  
Centro de Ciências Matemáticas e da Natureza  
Instituto de Geociências  
Departamento de Geografia



**JOSÉ FERNANDO RODRIGUES BEZERRA**



**GEOMORFOLOGIA E REABILITAÇÃO DE ÁREAS DEGRADADAS  
POR EROSÃO COM TÉCNICAS DE BIOENGENHARIA DE SOLOS  
NA BACIA DO RIO BACANGA, SÃO LUÍS – MA.**

**RIO DE JANEIRO  
2011**

**JOSÉ FERNANDO RODRIGUES BEZERRA**

**GEOMORFOLOGIA E REABILITAÇÃO DE ÁREAS DEGRADADAS POR  
EROSÃO COM TÉCNICAS DE BIOENGENHARIA DE SOLOS NA BACIA  
DO RIO BACANGA, SÃO LUÍS – MA.**

Tese de doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geografia da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como requisito parcial à obtenção do título de doutor em Ciências.

**Orientador:** Prof. Dr. Antônio José Teixeira Guerra.

**Co-orientador:** Prof. Dr. Michael A. Fullen.

**Rio de Janeiro  
2011**

**JOSÉ FERNANDO RODRIGUES BEZERRA**

**GEOMORFOLOGIA E REABILITAÇÃO DE ÁREAS DEGRADADAS POR EROSÃO  
COM TÉCNICAS DE BIOENGENHARIA DE SOLOS NA BACIA DO RIO BACANGA,  
SÃO LUÍS - MA.**

Tese de doutorado submetida ao corpo docente do Programa de Pós-Graduação em Geografia da Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Doutor.

Aprovada em \_\_\_\_/\_\_\_\_/\_\_\_\_

---

Prof. Dr. Antônio José Teixeira Guerra  
Departamento de Geografia - UFRJ  
(Orientador)

---

Prof. Dr. Michael A. Fullen  
School of Applied Sciences - University of Wolverhampton - UK  
(Co-orientador)

---

Prof. Dr. Antônio Soares da Silva  
Departamento de Geografia - UERJ

---

Prof. Dr. Evaristo de Castro Júnior  
Departamento de Geografia - UFRJ

---

Prof<sup>a</sup>. Dr. Mônica dos Santos Marçal  
Departamento de Geografia – UFRJ

---

Prof<sup>a</sup>. Dr. Rosangela Garrido Botelho  
Diretoria de Geociências - IBGE

*A minha mãe, Dagmar*

*A minha avó Nelsa*

*Ao meu pai José Francisco e minha avó Josefa*

*in memoriam*

### **Agradecimentos:**

A Deus pelo dom da vida e as portas abertas.

Ao professor Dr. Antônio José Teixeira Guerra da Universidade Federal do Rio de Janeiro pelo imenso apoio, dedicação e orientação na vida acadêmica e profissional.

Ao professor Dr. Antonio Cordeiro Feitosa da Universidade Federal do Maranhão pela dedicação, incentivo e iniciação a pesquisa científica.

Ao professor Dr. Silvio Carlos Rodrigues da Universidade Federal de Uberlândia pelo apoio na realização da pesquisa de mestrado.

Ao professor Dr. Mike A. Fullen da Universidade de Wolverhampton (UK) pelo apoio e dedicação na realização da pesquisa.

A professora Ms. Maria do Carmo Oliveira Jorge pelo incentivo e correções nos mapas da tese.

A Universidade de Wolverhampton, em especial ao Professor Trevor J. Hocking, aos técnicos Andrew Black, Clive L. Roberts, Keith Thompson, Barbara Hodson and David Townrow e aos doutores Ranjan Bhattacharyy, Madhu Subedi, Asha Kelay, Dan Appasamy pela assistência prestada durante a pesquisa.

Ao Laboratório de Hidrobiologia – LABOHIDRO, da Universidade Federal do Maranhão, pela preparação das amostras dos solos para exportação.

Ao Núcleo de Estudos e Pesquisas Ambientais da Universidade Federal do Maranhão, pelo auxílio na montagem do experimento.

Aos professores do Departamento de Geografia da Universidade Federal do Maranhão, Maria da Glória Rocha Ferreira, Zulimar Márta, Roberta Batista, Jorge Hamilton, Edgar e Trovão.

À aos meus amigos de Uberlândia, especialmente Rosângela, Malaquias, Paulinha, Baltazar, Gleiciane, Carioca, Clemilson, João Guilherme, Josenilson, Clarice, Tatiane, Paulinha e Danielle.

Aos meus grandes amigos do Rio de Janeiro, em especial Tatiana Guerra, Thiago Muniz, Frank Gundin, Ana Marcela, Patrícia Feitosa, Rafael, Ecivaldo e Marcelo Werner.

Aos meus amigos do LAGESOLOS, especialmente para Stela, Luiz Dias, Luiz Fernando, Felipe Bolinho, Hugo, Sara Regina, Guilherme, Rafael, Rafael Sathler, Luana, Renato, Fábio Lima, Frederico e Professora Mônica.

Aos meus eternos amigos Jane Karina Silva Mendonça e José de Ribamar Carvalho.

Aos meus grandes amigos: Maria Ferreira, Eulina, Jane, Nana, Lílian, Marcinha, Jodelma, Ulisses, Lenice, José Antônio, Neilianne, Fernanda e Lívia.

A todos os moradores da comunidade da Salina Sacavém pelo suporte nos trabalhos de campo, produção dos geotêxteis e reabilitação da voçoroca do Sacavém, em especial para Dona Telma, Aparecida e Seu Zé.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico CNPq, pela bolsa de doutorado sanduíche.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES, pela bolsa de doutorado.

A União Européia pelo apoio financeiro ao Projeto Borassus e reabilitação parcial da voçoroca do Sacavém.

*“O homem vangloria-se de ter imitado o vôo das aves com uma complicação técnica que elas dispensam”.*

**Carlos Drummond de Andrade**

## RESUMO

BEZERRA, José Fernando Rodrigues. Geomorfologia e reabilitação de áreas degradadas por erosão com técnicas de bioengenharia de solos na bacia do rio Bacanga, São Luís – MA. Rio de Janeiro: 2011. Tese (Doutorado em Geografia) - Programa de Pós- Graduação em Geografia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011.

Faz-se nesta pesquisa uma análise das características geomorfológicas da área da bacia do rio Bacanga, município de São Luís, relacionando-as com os processos erosivos em alto estágio de evolução, considerando nessa abordagem, a identificação das classes de fragilidade ambiental, o monitoramento de estação experimental e a reabilitação de área degradada com técnicas de bioengenharia de solos (Geotêxteis de buriti). Os procedimentos metodológicos constaram de: 1. Levantamento da documentação bibliográfica e cartográfica; 2. Elaboração dos mapas de hipsometria, declividade, solos, uso da terra, índices pluviométricos, fragilidade ambiental, geomorfologia da bacia do Bacanga; morfoestrutura, morfoescultura da área do Golfão Maranhense; 3. Construção de uma estação experimental com duas parcelas (réplicas) com geotêxteis e solo exposto, e com os seguintes parâmetros monitorados: índice de cobertura vegetal, pinos de erosão, potencial matricial, escoamento superficial e perda de sedimentos; 4. Reabilitação de um trecho da voçoroca do Sacavém, com técnicas de bioengenharia de solos. Os resultados dos mapeamentos indicaram que as voçorocas identificadas estão localizadas nas bordas das superfícies tabulares na bacia, sendo classificada como forte fragilidade ambiental. Na estação experimental, o maior intervalo de crescimento da cobertura vegetal foi registrado entre os meses de fevereiro (0%) e março (33,35%) de 2009, enquanto a menor diferença foi observada entre os meses de maio (75,88%) e junho (81,19%) de 2009, atingindo 5,31%. As diferenças nos pinos de erosão/deposição entre as duas réplicas com solo exposto foram significativas pelo teste não-paramétrico Kruskal-Wallis ( $P < 0,001$ ). Os resultados obtidos a partir da tensiometria nas profundidades de 10 cm, 20 cm, 40 cm e 60 cm, indicaram uma diferença significativa ( $P < 0,001$ ) entre as parcelas com geotêxteis e com solo exposto. O período de mensuração dos dados de potencial matricial (fevereiro a agosto de 2009) demonstrou que na parcela com geotêxteis, houve melhoria na circulação da água no perfil. Em relação às chuvas, foram registrados um total de 2.067,50 mm, produzindo um fluxo superficial total de 208,57 L m<sup>-2</sup> no experimento com geotêxteis e gramíneas e um escoamento de total de 494,63 L m<sup>-2</sup> na parcela com superfície exposta. Em relação à perda de sedimentos, os dados apresentaram diferenças significativas entre as duas parcelas, apontando para a eficiência dos geotêxteis e gramíneas como obstáculo para o transporte das partículas. A parcela com os biotêxteis de buriti perdeu 255,85 g m<sup>-2</sup> de sedimentos totais, enquanto que o experimento com a superfície exposta chegou a 4.390,96 g m<sup>-2</sup> totais. A reabilitação do trecho da voçoroca do Sacavém demonstrou a eficiência da aplicação da bioengenharia de solos como técnica de conservação dos solos.

Palavra-chaves: Geomorfologia, voçorocas, geotêxteis, reabilitação e bioengenharia de solos.

## ABSTRACT

BEZERRA, José Fernando Rodrigues (2011). Geomorfologia e reabilitação de áreas degradadas por erosão com técnicas de bioengenharia de solos na bacia do rio Bacanga, São Luís, Maranhão (English translation: Geomorphology and rehabilitation of erosion-degraded areas using soil bioengineering in the Rio Bacanga basin, São Luís, Maranhão). Ph.D. thesis, Federal University of Rio de Janeiro (in Portuguese, with English Abstract), 250 pages.

The research analysed the geomorphological characteristics of the Bacanga Basin of São Luís municipality. Basin characteristics were related to highly developed erosion processes. The approach considered the identification of environmental fragility classes, the monitoring of an experimental station and the rehabilitation of a degraded area using soil bioengineering techniques. The adopted methodological procedures included: 1. Cartographic and bibliographic surveys. 2. Mapping of the hypsometry, slope, land use, rainfall index and geomorphology of the Bacanga basin, along with analysis of the morphostructure and morphosculture of the Gulf of Maranhense and environmental fragility mapping. 3. Establishing an experimental station with two replicate erosion plots and measuring the following parameters: vegetation cover index, soil surface changes using erosion pins, soil matric potential, runoff and sediment loss. 4. The rehabilitation of Sacavém gully using soil bioengineering techniques (using geotextiles constructed from palm leaves of the Buriti tree).

Mapping showed that identified gullies are located on the plateau edges of the basin and are very fragile environments. The greatest interval of vegetation cover index development was between February (0%) and March (33.35%) (both 2009), whereas the smallest difference was 5.31%, between May (75.88%) and June (both 2009) (81.19%). The difference of erosion/deposition pins data within the bare and vegetated soil plots was significant using the non-parametric Kruskal-Wallis test ( $P < 0.001$ ). The results obtained from tensiometers at 10, 20, 40 and 60 cm depth showed a significant difference ( $P < 0.001$ ) between the bare and geotextile-covered plots. Soil matric potential measurements indicate that geotextile plots had an improved soil water regime. Rainfall during the measuring period (February-June 2009) was 2,067.5 mm. This caused a total of 494.6 L m<sup>-2</sup> runoff from the two bare plots and 208.6 L m<sup>-2</sup> from the two geotextile plots. There were significant differences in soil loss between the plot treatments, demonstrating the effectiveness of geotextiles plus grass in decreasing erosion rates. The two bare soil plots lost a total of 4,391.0 g m<sup>-2</sup>, while the geotextile plots lost a total of 255.9 g m<sup>-2</sup>. Rehabilitation work on Sacavém gully showed that soil bioengineering was a very effective soil conservation technique.

Key-words: Geomorphology, gullies, geotextiles, rehabilitation work and soil bioengineering.

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b>	15
<b>2. JUSTIFICATIVAS</b>	21
<b>3. HIPÓTESES</b>	24
<b>4. OBJETIVOS</b>	24
4.1 Objetivos gerais	24
4.2 Objetivos específicos	25
<b>5. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>	26
<b>6. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS</b>	46
6.1 Levantamento cartográfico e bibliográfico	46
6.2 Trabalho de campo	49
6.3 Elaboração dos mapas temáticos	50
6.4 Educação ambiental e produção de geotêxteis	52
6.5 Fragilidade ambiental	56
6.6 Mapeamento geomorfológico	62
6.7 Estação experimental com técnicas de bioengenharia	63
6.7.1 Índice de cobertura vegetal	68
6.7.2 Pinos de erosão	69
6.7.3 Potencial matricial	70
6.7.4 Escoamento superficial e transporte de sedimentos	72
6.8 Reabilitação de áreas degradadas com geotêxteis biodegradáveis	74

6.9 Análises de laboratório	77
6.10 Análises estatísticas	82
<b>7. RESULTADOS E DISCUSSÕES</b>	<b>83</b>
7.1 Características geoambientais da área	83
7.1.1 Uso e ocupação do solo	83
7.1.2 Geologia	88
7.1.3 Solos	91
7.1.4 Geomorfologia	94
7.1.5 Hidrografia	97
7.1.6 Clima	100
7.2 Espectrometria de fluorescência de raios X	103
7.3 Análise granulométrica	117
7.4 Mapeamento geomorfológico	127
7.5 Fragilidade ambiental na bacia do rio Bacanga	145
7.6 Estação experimental	155
7.6.1 Índice de cobertura vegetal	155
7.6.2 Pinos de erosão	169
7.6.3 Potencial matricial	183
7.6.4 Escoamento superficial e erosão	196
7.7 Exemplo de caso: Reabilitação de áreas degradadas com técnica de bioengenharia de solos na voçoroca do Sacavém - São Luís – MA	210
<b>8. CONCLUSÕES</b>	<b>223</b>
REFERÊNCIAS	226

**LISTA DE FIGURAS**

Figura 1 –	Mapa de localização da área de estudo	20
Figura 2 -	Vista em perspectiva e partes componentes de um tensiômetro munido de vacuômetro metálico	42
Figura 3 -	Pino de erosão visto em perfil	44
Figura 4 –	Coleta das amostras na profundidade de 5 cm na parcela com solo exposto b	49
Figura 5 –	Amostras de solos superficiais (cinco cm) provenientes das parcelas com geotêxteis com gramíneas e solo exposto	50
Figura 6 –	Palmeira do buriti	53
Figura 7 –	Geotêxtil produzido com a fibra do buriti	54
Figura 8 –	Participação da comunidade na produção dos geotêxteis	55
Figura 9 –	Participação da comunidade nos trabalhos de reabilitação do trecho da voçoroca do Sacavém	55
Figura 10 –	Construção da estação experimental	65
Figura 11 -	Adição de camada de dois cm de sedimentos (barro) e camada de 3 cm de terra preta	65
Figura 12 –	Estação experimental com parâmetros avaliados	66
Figura 13 –	Esquema da estação experimental	67
Figura 14 –	Estação experimental	67
Figura 15 –	Área de 1 m <sup>2</sup> com um marco no centro para o acompanhamento do índice de cobertura vegetal	68
Figura 16 –	Pinos de erosão (Pregos) com 20 cm de comprimento	69
Figura 17 -	Trado adaptado para instalação dos tensiômetros	70
Figura 18 –	Preenchimento de água nos tensiômetros	71
Figura 19 –	Diferentes galões para o monitoramento do escoamento superficial e perda de sedimentos	73
Figura 20 –	Calhas coletoras de sedimentos na estação experimental	73
Figura 21 –	Retaludamento da área com retroescavadeira	75
Figura 22 –	Retaludamento com trabalho manual	75
Figura 23 –	Aplicação dos geotêxteis e insumos	76
Figura 24 –	Manutenção dos trabalhos de reabilitação	76
Figura 25 –	Filtragem das amostras de água	77
Figura 26 –	Queima da matéria orgânica nas amostras no forno mufla	78
Figura 27 –	Equipamento utilizado nas análises de espectrometria de fluorescência de raios-X	79
Figura 28 –	Prensa hidráulica utilizada	80
Figura 29 -	Compactação das amostras, resultando numa pastilha de 3 cm de diâmetro	80

Figura 30 –	Equipamento utilizado para a granulometria a laser	81
Figura 31 –	Mapa de uso e ocupação do solo na área da bacia do rio Bacanga	86
Figura 32 -	Ocupação na área da bacia do rio Bacanga, nas proximidades da voçoroca do Sacavém	87
Figura 33 –	Vegetação secundária mista no Parque estadual do Bacanga (Voçoroca do Batatã)	87
Figura 34 –	Voçoroca do Coeduc na Formação Itapecuru	89
Figura 35 –	Voçoroca do Itaqui na Formação Barreiras	89
Figura 36 -	Mapa de geologia da bacia do rio Bacanga	90
Figura 37 -	Argissolo vermelho-amarelo com lateritas (voçoroca da Vila Maranhão)	92
Figura 38 –	Neossolos Regolíticos (voçoroca do Sacavém)	92
Figura 39 -	Mapa de solos da bacia do rio Bacanga	93
Figura 40 -	Forma tabular com processos erosivos nas bordas, proximidades da voçoroca do Gapara	95
Figura 41 –	Superfícies tabulares e subtabulares com processos erosivos nas bordas, proximidades da voçoroca Torre	95
Figura 42 -	Mapa de hipsometria da bacia do rio Bacanga	96
Figura 43 -	Mapa de sombreamento do relevo com respectiva drenagem	98
Figura 44 –	Vista parcial da bacia do rio Bacanga	99
Figura 45 –	Reservatório da Batatã na bacia do rio Bacanga, proximidades da voçoroca do Batatã	99
Figura 46 –	Média mensal das chuvas em São Luís (1961-1998)	101
Figura 47 –	Pluviosidade total anual em São Luís (1961-1998).	101
Figura 48 -	Mapa de índices pluviométricos da bacia do rio Bacanga	102
Figura 49 –	Diferenças na concentração de Fósforo (P) nos pontos amostrais	109
Figura 50 –	Diferenças na concentração de Potássio (K) nos pontos amostrais	111
Figura 51 –	Diferenças na concentração de Cálcio (Ca) nos pontos amostrais	113
Figura 52 –	Diferenças na concentração de Magnésio (Mg) nos pontos amostrais	114
Figura 53 –	Diferenças na concentração de Enxofre (S) nos pontos amostrais	116
Figura 54 –	Diagrama triangular dos pontos amostrais na estação experimental e nas voçorocas na bacia do rio Bacanga	121
Figura 55 -	Conteúdo de argila dos pontos amostrais na estação experimental e nas voçorocas na bacia do rio Bacanga	124
Figura 56 -	Conteúdo de silte dos pontos amostrais na estação experimental e nas voçorocas na bacia do rio Bacanga	125
Figura 57 -	Conteúdo de areia dos pontos amostrais na estação experimental e nas voçorocas na bacia do rio Bacanga	126
Figura 58 -	Síntese da estratigrafia da Bacia de Grajaú	130

Figura 59 -	Síntese da litoestratigrafia da Bacia de São Luís	131
Figura 60 –	Coluna estratigrafia da Bacia de Barreirinhas	133
Figura 61 –	Mapa das unidades morfoestruturais e morfoesculturais do Golfão Maranhense	137
Figura 62 –	Ravinamentos na voçoroca do Maracanã	140
Figura 63 –	Ravinamentos nas proximidades da voçoroca do Posto	140
Figura 64 –	Perfil topográfico transversal da bacia do rio Bacanga	141
Figura 65 –	Mapa de geomorfologia da bacia do rio Bacanga	143
Figura 66 –	Mapa de declividade da bacia do rio Bacanga	144
Figura 67 –	Mapa de fragilidade ambiental da bacia do rio Bacanga	154
Figura 68 –	Índice de cobertura vegetal do mês de fevereiro	159
Figura 69 –	Início do crescimento da cobertura de gramíneas, com geotêxteis de buriti servindo como <i>mulch</i>	160
Figura 70 –	Índice de cobertura vegetal do mês de março	161
Figura 71 –	Índice de cobertura vegetal do mês de abril	163
Figura 72 –	Índice de cobertura vegetal do mês de maio	165
Figura 73 –	Índice de cobertura vegetal do mês de junho	166
Figura 74 –	Estação experimental sem a presença de cobertura de gramíneas	167
Figura 75 –	Estação experimental com cobertura de gramíneas no dia 03 de março de 2009	167
Figura 76 –	Estação experimental com cobertura de gramíneas no dia 21 de abril de 2009	168
Figura 77 –	Estação experimental com cobertura de gramíneas no dia 17 de maio de 2009	168
Figura 78 –	Erosão por salpicamento na parcela com solo exposto a	172
Figura 79 –	Erosão diferencial, expondo as lateritas, na parcela com solo exposto b	172
Figura 80 –	Resultados do monitoramento dos pinos de erosão/deposição no mês de fevereiro	175
Figura 81 –	Resultados do monitoramento dos pinos de erosão/deposição no mês de março	176
Figura 82 –	Resultados do monitoramento dos pinos de erosão/deposição no mês de abril	178
Figura 83 –	Resultados do monitoramento dos pinos de erosão/deposição no mês de maio	180
Figura 84 –	Resultados do monitoramento dos pinos de erosão/deposição no mês de junho	182
Figura 85 –	Potencial matricial nas profundidades de 10 cm, 20 cm, 40 cm e 60 cm nas parcelas com geotêxteis com gramíneas	189
Figura 86 –	Potencial matricial nas profundidades de 10 cm, 20 cm, 40 cm e 60 cm nas parcelas com solo exposto	189

Figura 87 –	Mapeamento dos valores médios das poro-pressões negativas nas profundidades de 10 cm, 20 cm, 40 cm e 60 cm nas parcelas com geotêxteis e solo exposto	192
Figura 88 –	Mapeamento das poro-pressões negativas nas profundidades de 10 cm, 20 cm, 40 cm e 60 cm nas parcelas com geotêxteis e solo exposto no mês de abril	193
Figura 89 –	Mapeamento das poro-pressões negativas nas profundidades de 10 cm, 20 cm, 40 cm e 60 cm nas parcelas com geotêxteis e solo exposto no mês de julho	195
Figura 90 –	Variação temporal do escoamento superficial na estação experimental	197
Figura 91 –	Variação temporal da perda de sedimentos na estação experimental	197
Figura 92 -	Taxas de infiltração da voçoroca do Sacavém nos períodos de estiagem e chuvoso	201
Figura 93 –	Diferenças no efeito <i>splash</i> nas parcelas com geotêxteis e solo exposto no início do monitoramento da estação experimental	202
Figura 94 –	Sedimento transportado para o galão da parcela com solo exposto b	202
Figura 95 –	Sedimentos depositados na calha da parcela com solo exposto	204
Figura 96 –	Sedimentos depositados na calha da parcela com geotêxteis	204
Figura 97 –	Diferença na geração do escoamento superficial e perda de sedimentos entre as parcelas com geotêxteis com gramíneas (GE) e solo exposto (SE)	207
Figura 98 –	Diferenças na geração do escoamento superficial nas parcelas com geotêxteis com gramíneas e solo exposto	207
Figura 99 -	Correlação entre precipitação e escoamento superficial	208
Figura 100 –	Correlação entre precipitação e perda de sedimentos	209
Figura 101 -	Correlação entre escoamento e perda de sedimentos	209
Figura 102 –	Pluviosidade total anual em São Luís no período de 1971 a 1998, 2003 a 2008	212
Figura 103 –	Média mensal das chuvas em São Luís no período de 1971 a 1998, 2003 a 2008	212
Figura 104 –	Vista parcial da voçoroca do Sacavém	214
Figura 105 –	Croqui da voçoroca do Sacavém	215
Figura 106 –	Área com aplicação da técnica	221
Figura 107 –	Aplicação dos geotêxteis e insumos	221
Figura 108 –	Contenção dos sedimentos pelos geotêxteis na voçoroca do Sacavém	222
Figura 109 -	Área com aplicação da técnica após um mês	222

## TABELAS

Tabela 1 –	Patrimônios ameaçados por voçorocamentos no município de São Luís (2001 – 2002)	23
Tabela 2 –	Classes de fragilidade com respectivos pesos para bacia do rio Bacanga	57
Tabela 3 –	Classes de fragilidade dos solos	58
Tabela 4 –	Fragilidade ambiental dos diferentes usos da Terra / cobertura vegetal	59
Tabela 5 –	Níveis hierárquicos das características pluviométricas	61
Tabela 6 –	Despesas do projeto de recuperação da voçoroca do Sacavém	74
Tabela 7 –	Potencial de Hidrogênio (pH) das voçorocas do Coeduc, Sacavém e Torre	104
Tabela 8 –	Propriedades químicas da fibra do buriti	105
Tabela 9 –	Valores médios dos macronutrientes na estação experimental e nas voçorocas na bacia do rio Bacanga (n = número de amostras)	108
Tabela 10 –	Resultados das análises granulométricas nas voçorocas da bacia do rio Bacanga	119
Tabela 11 –	Resultados das análises granulométricas nas parcelas com Geotêxteis com gramíneas (GE) e Solo Exposto (SE) e na estação experimental	120
Tabela 12 –	Feições geomorfológicas e respectivas representatividades espaciais	138
Tabela 13 –	Fragilidade ambiental associada aos índices pluviométricos	146
Tabela 14 –	Fragilidade dos usos e coberturas na bacia do rio Bacanga	147
Tabela 15 –	Classes de fragilidade dos solos com atual classificação da EMBRAPA (1999) da bacia do rio Bacanga	148
Tabela 16 -	Intervalos de declividade com respectivas fragilidades ambientais na bacia do rio Bacanga	149
Tabela 17 –	Resultados do monitoramento dos pinos de erosão nas duas parcelas com solo exposto	171
Tabela 18 –	Estatística descritiva dos dados de potencial matricial nas parcelas com geotêxteis com gramíneas e solo exposto	185
Tabela 19 –	Valores mensais de escoamento superficial e perda de sedimentos na estação experimental	198
Tabela 20 –	Síntese da estatística descritiva	205
Tabela 21 –	Dados do monitoramento da voçoroca do Sacavém	214

## 1. INTRODUÇÃO

A Geomorfologia surge como fonte de conhecimento, cujo objeto se fundamenta na busca da explicação da evolução das formas e processos que deram origem ao modelado terrestre, procurando compreender a evolução temporal do relevo através da atividade dos agentes e processos morfogenéticos, tendo em vista a escala de atuação dos processos físicos, químicos e biológicos, bem como a intervenção humana na dinâmica da paisagem (CHISTOFOLETTI, 1980; PENTEADO, 1980; RITTER, 1986; COOKE & DOORNKAMP, 1991; SUMERFIELD, 1991; SELBY, 1993; GUERRA & CUNHA, 1996; BLOOM, 1998; STRAHLER & STRAHLER, 2000, CASSETI, 2005; HJORTA & MARMIONB, 2008; MURRAY *et al.*, 2009). No tocante à intervenção antrópica no relevo, nos últimos anos, a Geomorfologia vem contribuindo de forma significativa com a abordagem dessa temática através do enfoque ambiental (GARDINER, 1986; TRICART, 1986; THORNES, 1990; GUERRA & CUNHA, 1996; ROSS, 2003; GUERRA & MARÇAL, 2006; GREGORY *et al.*, 2008; RUIZ-SINOGA & MARTÍNEZ-MURILLO, 2009; SHOU *et al.*, 2009).

A inserção da Geomorfologia nos estudos ambientais está direcionada para a compreensão das formas do relevo, procurando-se estabelecer a explicação genética e as inter-relações com os demais componentes da natureza. Nesse contexto, a erosão dos solos ganha destaque nos estudos geomorfológicos.

A erosão é um dos principais processos de modificação da paisagem, podendo ser intensificada pela ação antrópica; essa interferência pode ser percebida de forma direta em áreas urbanas e rurais. Nos centros urbanos, onde a transformação da paisagem apresenta-se de forma desordenada, sem que haja um

planejamento adequado, os problemas ambientais são eminentes, como erosão, assoreamento, poluição e contaminação dos recursos hídricos entre outros que afetam a qualidade de vida da população (OLIVEIRA, 1999; SILVA, 1999; SALOMÃO, 1999; SUDO, 2000; FULLEN & GUERRA, 2002, FULLEN & CATT, 2004; ARAÚJO *et al.*, 2005; GANGOLELLS *et al.*, 2009; GOETHALS *et al.*, 2009).

Os processos erosivos encontram-se diretamente relacionados ao desequilíbrio da paisagem, que pode ter origem natural, antrópica ou conjugada. Para Sudo (2000), a modalidade de erosão acelerada ou antrópica, caracteriza-se pela retirada das camadas superficiais dos solos, numa velocidade muito maior do que a natureza é capaz de reconstituí-las, de tal maneira que a consequência final pode ser a exposição da rocha matriz às intempéries.

No estado do Maranhão, esse processo demonstra-se cada vez mais intenso, tendo como uma das principais causas, o desmatamento freqüente em áreas de rápido crescimento urbano. Esses fenômenos estão sendo registrados com maior intensidade nas áreas de expansão demográfica recente, onde são identificadas zonas de risco ambiental potencial implicando perdas de patrimônio e risco de vida (MENDONÇA *et al.*, 2001; BEZERRA, *et al.*, 2005; SATHLER *et al.*, 2005; FURTADO *et al.*, 2006; BEZERRA & GUERRA, 2007; BEZERRA *et al.*, 2009).

No município de São Luís, encontram-se vários trechos em que se identificam fenômenos erosivos em larga escala, destacando-se as voçorocas da bacia do rio Bacanga. Esta bacia possui uma área de 95,24 km<sup>2</sup> e está localizada na porção Centro-NW da Ilha do Maranhão e do município de São Luís, sua nascente está inserida no tabuleiro do Tirirical (Figura 1).

Ao longo da área de estudo foram identificados processos erosivos em alto estágio de evolução, como as voçorocas do Coeduc, Batatã, Gapara, Itaqui, Maracanã, Posto, Sacavém, Torre e Vila Maranhão, o que vem a ser um agravante, devido ao elevado índice de urbanização da bacia, tendo também características físicas e sócio-ambientais propícias à ocorrência desses processos (MENDONÇA *et al.*, 2002; BEZERRA *et al.*, 2005; SATHLER *et al.*, 2005; FURTADO *et al.*, 2006; BEZERRA & GUERRA, 2008; BEZERRA *et al.*, 2009).

A área apresenta características favoráveis à ocorrência de erosão, com a média de precipitação anual, nos últimos trinta anos acima de 2.000 mm, concentrada em um período chuvoso e outro seco (FEITOSA, 1989; 1996; MARANHÃO, 1998). Os solos são suscetíveis à erosão, provenientes das Formações Itapecuru e Barreiras constituídas predominantemente de arenitos, argilitos e siltitos inconsolidados, quanto aos aspectos geomorfológicos apresentam formas tabulares e subtabulares, intercaladas por colinas dissecadas (FEITOSA, 1989, 1996; MARANHÃO, 1998).

Associado a essas características, a interferência antrópica, através do uso inadequado do solo, como o desmatamento, obras de engenharia, especulação imobiliária, retirada de material para construção (laterita, areia fina, silte e argila), desconsiderando os limites impostos pelo ambiente, está acelerando a evolução dos processos erosivos na área de estudo. A associação do conhecimento geomorfológico, com outras áreas de conhecimento, como a Bioengenharia, pode oferecer ferramentas que auxiliem na contenção desses processos.

As medidas de bioengenharia são um caso especial de estabilização biotécnica, no qual plantas e partes de plantas são arranjadas no solo em padrões e configurações especiais. Essa técnica possui as seguintes características: reforço para o solo, barreiras contra o movimento de terra, concentradores de umidade e drenos hidráulicos. As raízes adventícias ao longo do comprimento das estacas e ramos oferecem um reforço secundário (ARAÚJO, *et al.*, 2005; DEFLORE, 2005).

Na bacia do rio Bacanga, o monitoramento de experimentos com a utilização dos geotêxteis biodegradáveis produzidas com fibra vegetal (buriti), pode apontar para uma boa solução na contenção dos processos erosivos. A bioengenharia de solos, com auxílio da geomorfologia e outras ciências, pode solucionar essa problemática de degradação dos solos, sendo uma associação de técnicas de engenharia e biológica, baseando-se na utilização de materiais flexíveis (biomanta) e rígidos (ferro, concreto, etc.). Uma das grandes vantagens dessa técnica é o desenvolvimento de microorganismos, devolvendo a vida aos solos erodidos. A bioengenharia de solos é recente no Brasil, que é um país rico em recursos vegetais, caracterizando-se pelo custo reduzido, chegando até 1/3 dos gastos de uma obra de engenharia tradicional (DEFLORE, 2005; FULLEN & GUERRA, 2002; BEZERRA, 2006; MENDONÇA, 2006; DESCHEEMAER *et al.*, 2006; SMETS *et al.*, 2009; FATAHIA *et al.*, 2010).

O geotêxtil é uma manta anti-erosiva colocada sobre o solo e confeccionada a partir de diversos materiais, podendo ser produzida com folhas de palmáceas, que tem como características a biodegradabilidade. Os geotêxteis vêm contribuindo como uma técnica de conservação do solo desde 1950, utilizada principalmente nos projetos de engenharia. Recentemente, outros profissionais vêm utilizando essa

técnica, com diversos tipos de materiais, como a fibra da palmeira do buriti (FULLEN & GUERRA, 2002, SMETS *et al.*, 2009, BHATTACHARYYA, 2010).

Esta pesquisa constitui parte do Projeto Borassus intitulado "As contribuições ambientais e socioeconômicas dos geotêxteis feitos com folhas de palmeiras para atingir-se o desenvolvimento sustentável e a conservação dos solos" (INCO-CT-2005-510745), patrocinado pela Comissão Européia (CE), Programa de Projetos de Pesquisa com Objetivos Específicos (FP6 - STREPs) para Países em Desenvolvimento (INCO-DEV). O referido Projeto foi coordenado pela Universidade de Wolverhampton a nível internacional e a nível nacional pela Universidade Federal do Maranhão - UFMA e Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ, tendo sido apoiado pela União Européia, envolvendo 10 países: Inglaterra, Bélgica, Hungria e Lituânia (Europa), África do Sul e Gâmbia (África), China, Vietnam e Tailândia (Ásia) e Brasil (América do Sul), objetivando a recuperação de áreas degradadas por erosão utilizando técnicas de bioengenharia de solos e palmeiras nativas como matéria prima, envolvendo comunidades carentes desses países, buscando o equilíbrio entre desenvolvimento econômico e a preservação ambiental (MENDONÇA, 2006).

Faz-se nesta pesquisa a análise das características geomorfológicas da área da bacia do rio Bacanga, município de São Luís, relacionando-as com os processos erosivos em alto estágio de evolução, a partir do mapeamento geomorfológico, da identificação da fragilidade ambiental, e do monitoramento da estação experimental com técnicas de bioengenharia de solos (geotêxteis de buriti), construída nas dependências da Universidade Federal do Maranhão, com os seguintes parâmetros avaliados: índice de cobertura vegetal, pinos de erosão, potencial matricial, escoamento superficial e erosão.

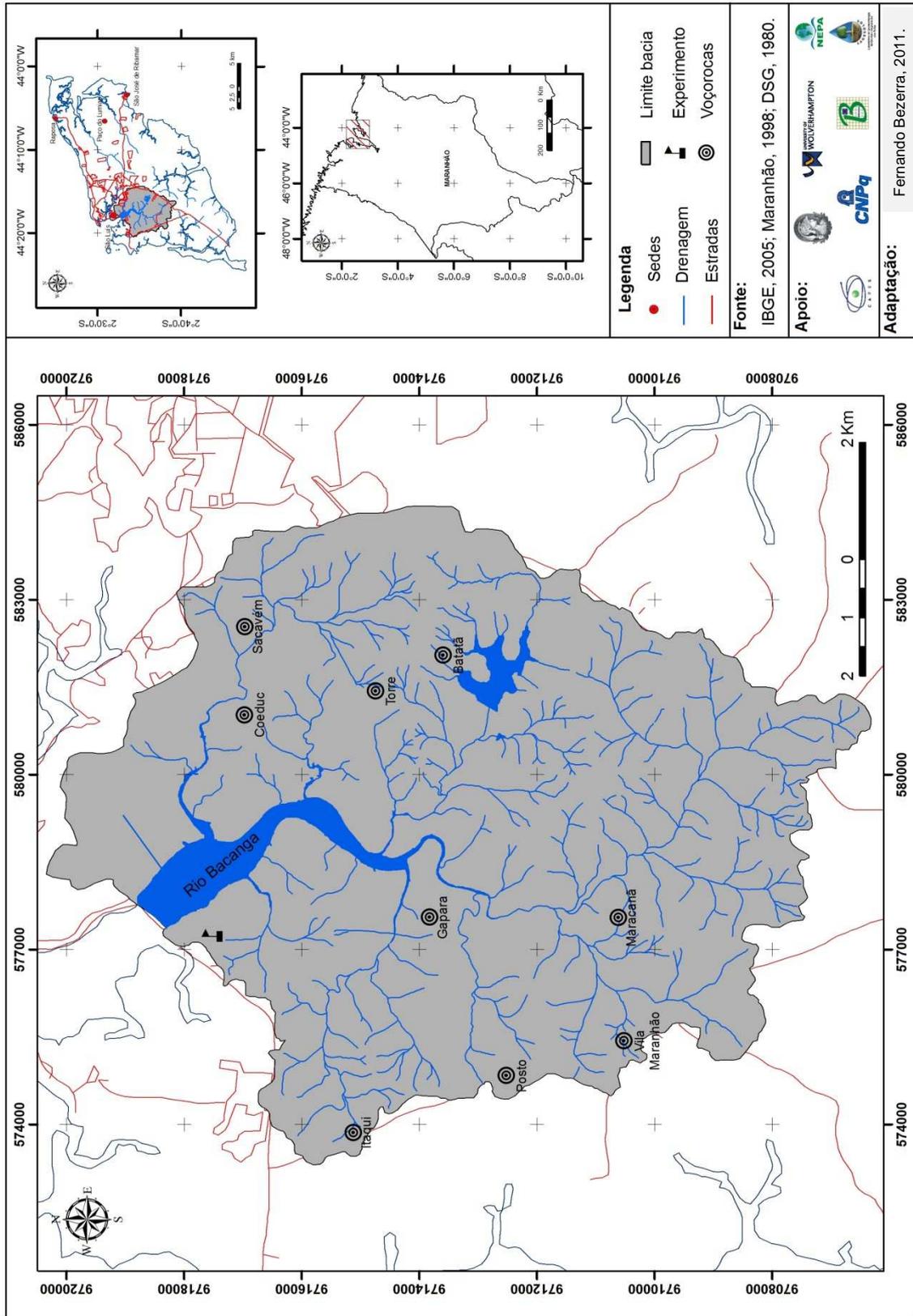


Figura 1 – Mapa de localização da bacia do Rio Bacanga

## 2. JUSTIFICATIVAS

Com a crescente urbanização, os problemas sócio-ambientais nas cidades se intensificam, devido ao crescimento desordenado, desconsiderando os limites impostos pelo ambiente. Nesse sentido, os processos erosivos tornam-se cada vez mais presentes nos centros urbanos, em todo país, principalmente nas zonas de cobertura sedimentar recente, contendo sedimentos inconsolidados e friáveis. Com a intensificação desses processos tem-se a necessidade da produção de trabalhos que analisem a complexidade dessa problemática, identificando suas causas e fatores determinantes, no intuito de se evitar efeitos catastróficos.

Na área da bacia do rio Bacanga, foram desenvolvidos poucos estudos sobre as características geomorfológicas e dos processos erosivos, principalmente no que se refere às formas do terreno e da intensidade dos agentes morfogenéticos e suas relações com a ocupação do solo. Nas três últimas décadas, devido ao rápido e desordenado processo de ocupação espacial, que culminou numa série de problemas ambientais, tem-se observado a aceleração da atividade dos agentes e processos geomorfológicos. A soma desses fatores pode desencadear danos ao patrimônio e risco à vida humana na área do município de São Luís (Tabela 1).

A Geomorfologia pode contribuir na recuperação dessas áreas, em conjunto com a Engenharia, Geologia, Pedologia, Bioengenharia de solos e outras ciências afins. Nem sempre a melhor solução precisa ser necessariamente um grande muro de arrimo, muitas vezes, outras técnicas, ditas naturais e de custo mais baixo, podem trazer os mesmos benefícios, sem transformar tanto a paisagem anterior. Além disso, sua durabilidade pode ser igual ou até maior do que as obras tradicionais de contenção de encostas feitas pela engenharia.

A busca de novas metodologias na pesquisa é uma característica essencial do desenvolvimento científico. Essa busca caracterizada por constantes questionamentos sobre o conhecimento convencional é o que direciona esta pesquisa. Durante décadas, a engenharia tradicional foi vista por muitos como a única forma de reabilitação de encostas degradadas, com a utilização de muros de arrimo, grandes quantidades de concreto e ferro, que impediam a infiltração e aceleravam a formação do escoamento superficial.

Com este estudo aplicou-se uma metodologia alternativa na reabilitação de áreas degradadas por erosão na voçoroca do Sacavém na bacia do rio Bacanga, quando comparada à engenharia tradicional, que garantiu o retorno das características mais próximas ao equilíbrio natural (infiltração, retorno da fauna e flora, etc.), além do baixo custo da aplicação da técnica. Espera-se também contribuir para a construção do conhecimento geomorfológico da Ilha do Maranhão, através da produção de informações sobre as características físicas e ambientais da região, que são fundamentais para subsidiar tomadas de decisões das autoridades públicas, nas três esferas do poder, e novos estudos com vistas ao planejamento e à conservação dos recursos naturais, bem como o parcelamento, o uso e ocupação dos solos urbano e rural.

Dessa forma, justifica-se a importância desse estudo, tendo em vista a aplicação do conhecimento geomorfológico nos estudos de reabilitação de áreas degradadas com técnicas de bioengenharia de solos, como também a formulação de estratégias e planejamento para o desenvolvimento dos aspectos sócio-econômicos da comunidade afetada. Em áreas com grande disponibilidade de mão-de-obra, como na periferia de São Luís, a fabricação artesanal dos geotêxteis pode complementar a renda dessas comunidades.

Tabela 1 – Patrimônios ameaçados por voçorocamentos no município de São Luís (2001 – 2002).

ANO	PATRIMÔNIO AMEAÇADO		VIDAS HUMANAS	LOCALIDADE
	TIPO	QUANTIDADE		
2001	Casa	506	-	Alto do Parque Timbira Bom Jesus Coroadinho Sítio do Pica-pau Amarelo Vila Conceição Vila dos Frades Vila dos Nobres Vila Natal Vila Nice Lobão Vila Alegria Vila Embratel Barreto Vila Dom Luís São Raimundo Vila Cafeteira Rua da Vitória (Sacavém) Anjo da Guarda Vila Nova Vila Mauro Fecury
2001	rodovia	01	-	Jerônimo de Albuquerque.
2001	casa	sem informação	-	Salinas do Sacavém
2001	casa	sem informação	-	Vila Embratel
2001	rodovia	01	-	Maiobão
2001	casa	sem informação	-	Vila Lobão São Raimundo Coroadinho
2002	rodovia	01	-	Estrada da Maioba
2002	casa/avenida	sem informação	-	Vila Lobão
2002	casa	sem informação	-	Coroadinho Vila dos Frades Parque Timbira Sítio do Pica-Pau Amarelo Vila Nice Lobão Bom Jesus Vila Primavera Vila Embratel Vila Lobão Vila Ayrton Sena Sacavém Salina do Sacavém

Fonte: Jornal o Estado do Maranhão 2001, 2002.

### 3. HIPÓTESES

As características geomorfológicas da bacia do rio Bacanga, como formas tabulares, subtabulares e colinas dissecadas, associadas ao inadequado uso e manejo do solo e as chuvas concentradas, influenciam o início e o desenvolvimento de processos erosivos acelerados.

Os geotêxteis biodegradáveis associadas à cobertura vegetal constituem uma boa técnica de reabilitação de áreas degradadas por voçorocamento, pois reduzem o escoamento superficial e a erosão, servem como *mulch* para a germinação e desenvolvimento da cobertura vegetal e garantem a circulação da água no perfil no solo.

### 4. OBJETIVOS

#### 4.1 Objetivos gerais

A pesquisa apresenta os seguintes objetivos gerais:

- Analisar a dinâmica geomorfológica, relacionando-a com os processos erosivos em alto estágio de evolução na área da bacia do rio Bacanga, tendo em vista a aplicação desse conhecimento, juntamente com a bioengenharia de solos, na reabilitação dos voçorocamentos;

- Investigar a eficiência dos geotêxteis biodegradáveis de buriti e da cobertura vegetal na redução do escoamento superficial e controle do transporte de sedimentos, através do monitoramento de estação experimental na bacia do rio Bacanga.

## **4.2 Objetivos específicos**

Em relação aos objetivos específicos, estes constam:

- Caracterizar os diferentes compartimentos geomorfológicos através do mapeamento das feições do relevo;
- Analisar o mapa de fragilidade ambiental na bacia do Bacanga, e correlacionar essa informação com as áreas degradadas por voçorocamento;
- Identificar os macronutrientes e a textura dos solos na área da bacia, para comparações com estudos posteriores;
- Monitorar e avaliar o potencial matricial no solo, índice de cobertura vegetal, pinos de erosão nas parcelas com geotêxteis biodegradáveis de buriti e gramíneas, e compará-los com a parcela com solo exposto;
- Aplicar a técnica de bioengenharia de solos com geotêxteis biodegradáveis de buriti na voçoroca do Sacavém.

## 5. REFERENCIAL TEÓRICO-METODOLÓGICO

As concepções teóricas relacionadas com a área-objeto do presente estudo carecem de reformulação direta em face da inexistência de trabalhos científicos que apresentem o suporte de conhecimentos à compreensão e explicação dos arranjos espaciais dos ecossistemas e geossistemas dominantes. Contudo, encontram-se referências produzidas relativamente a outras regiões que podem ser adaptadas visando à consecução dos objetivos propostos. Procedeu-se a análise do material bibliográfico incluindo livros, artigos, periódicos, monografias, dissertações e teses, e que serão adaptados para a área de estudo.

A Geomorfologia, de acordo com Derbyshire *et al.*, (1979):

É a ciência que estuda as formas do relevo e sua respectiva evolução. Etimologicamente o termo significa o estudo das formas da Terra. Entretanto, faz-se necessário um completo entendimento dos processos geomorfológicos para a compreensão dessas formas. A geomorfologia engloba um conjunto de técnicas de investigações sobre o modelado terrestre, capaz de estipular a evolução natural do relevo e prever suas transformações futuras (DERBYSHIRE *et al.*, 1979).

Para Christofolletti (2001), a Geomorfologia analisa:

As formas de relevo focalizando suas características morfológicas, materiais componentes, processos atuantes e fatores controlantes, bem como a dinâmica evolutiva. Compreende os estudos voltados para os aspectos morfológicos da topografia e da dinâmica responsável pelo funcionamento e pela esculturação das paisagens topográficas. Dessa maneira, ganha relevância por auxiliar a compreender o modelado terrestre, que surge como elemento do sistema ambiental físico e condicionante para as atividades humanas e organizações espaciais (CHRISTOFOLLETTI, 2001).

A análise sistemática das formas do relevo em termos de estrutura, processos e tempo parece ser inevitável. As paisagens não são imutáveis, na verdade elas passam uma idéia que estão em contínuo processo de transformação. A estrutura está sendo alterada pelos processos, ocorrendo em um determinado

tempo. Existe uma grande dificuldade em se estipular o tempo absoluto da atuação desses processos na escala geológica, como também a taxa de mudança das formas, tendo em vista uma grande variação de processos e estruturas encontradas na superfície terrestre (BLOOM, 1998).

Os processos geomorfológicos envolvem os agentes físicos e químicos que modificam as formas do relevo terrestre. Um fator geomórfico pode ser definido como qualquer meio natural capaz de transformar ou transportar um determinado elemento da superfície. A água corrente, a ação do gelo, vento, ondas e marés são considerados grandes agentes geomorfológicos. A combinação desses agentes resulta em diferentes processos que atuam na modificação do modelado terrestre (THORNBURY, 1954).

Na geomorfologia experimental há a necessidade de se realizar o monitoramento por meio de medidas e experimentos de campo e laboratório, buscando índices quantitativos dos processos erosivos, levando-se em conta a periodicidade das mensurações e a regularidade das amostragens, a fim de se ter uma idéia da frequência e taxa dos processos erosivos (BACCARO, 1999; CASSETI, 2005; BEZERRA, 2006; SMETS & POESEN, 2009; BHATTACHARYYA *et al.*, 2009; BHATTACHARYYA *et al.*, 2010; BHATTACHARYYA, 2010).

As formas de relevo representam a expressão espacial de uma superfície, compondo as diferentes configurações da paisagem morfológica. É o seu aspecto visível, a sua configuração que caracteriza o modelado topográfico de uma área (CHRISTOFOLETTI, 1980).

Esse modelado topográfico, quando analisado em conjunto, como no caso de uma bacia hidrográfica pode elucidar uma série de questões relacionadas à pesquisa geomorfológica e ambiental. Uma forma de analisar e compreender o

modelado topográfico são o estudo da compartimentação do relevo, que é fundamental na obtenção de dados quantitativos e qualitativos sobre a tipologia das formas e a atuação dos fatores, agentes e processos morfogenéticos na superfície terrestre.

De acordo com Guerra & Guerra (1997), a compartimentação do relevo é uma técnica que utiliza o desnivelamento de altitude como parâmetro indicador do grau de encaixamento da drenagem, ou índice de dissecação do relevo. Dessa forma, nota-se a grande importância dessa técnica no planejamento ambiental e na determinação do uso e ocupação dos solos.

Outro aspecto importante dentro da temática geomorfológica refere-se às questões metodológicas do mapeamento do relevo e adoção da escala de trabalho.

Argento (2001) considera que:

A metodologia do mapeamento geomorfológico tem como base a ordenação dos fenômenos mapeados, segundo uma taxonomia que deve estar aferida a uma determinada escala cartográfica. Exemplificando: os agrupamentos constituídos de tipos de modelados permitem a identificação de unidades geomorfológicas, assim como os agrupamentos dessas unidades constituem as regiões geomorfológicas, surgem os grandes domínios morfoestruturais. Os mapeamentos temáticos identificados dos grandes domínios morfoestruturais e das regiões geomorfológicas são condizentes a escalas iguais ou menores de 1:100.000 como, por exemplo, a de 1:250.000; porém, os mapeamentos condizentes com as unidades geomorfológicas devem estar aferidos a escalas de até 1:50.000 (ARGENTO, 2001).

Tendo em vista as recomendações da Sub-Comissão das Cartas Geomorfológicas da UGI (União Geográfica Internacional), a carta geomorfológica de detalhe, em escala grande, deve comportar quatro tipos de dados: morfométricos, morfográficos, morfogenéticos e cronológicos, baseados nos estudos de Tricart (1965) *apud* Casseti (2005):

a) Morfométricos: correspondem às informações métricas importantes, apoiadas em cartas topográficas ou outras formas de levantamento. Geralmente as informações métricas são intrínsecas aos sinais ou símbolos para a representação das formas do relevo, a exemplo de extensão de terraços ou escarpas erosivas, declividade de vertentes, dentre outras. b) Morfográficos: correspondem a formas de relevo resultantes do processo evolutivo, sendo sintetizadas como formas de agradação e de degradação. Como formas de degradação destacam-se as formas de erosão diferencial, as escarpas de falha ou erosivas, ravinas e boçorocas. Como formas de agradação destacam-se depósitos aluviais em planícies de inundação, concentração de colúvios pedogenizados ou pedimentos detríticos inumados.; c) Morfogênicos: referem-se aos processos responsáveis pela elaboração das formas representadas. Assim, na representação cartográfica do relevo, as diversas formas devem figurar de tal maneira que sua origem ou sua gênese sejam diretamente inteligíveis. d) Cronológicos: correspondem ao período de formação ou elaboração de formas ou feições. A representação cronológica pode ser expressa através de cores, que mesmo que adotadas com outro sentido, podem oferecer subsídios dessa natureza (CASSETI, 2005).

Ross (2003) propõe seis níveis para a representação geomorfológica:

1<sup>o</sup> táxon: unidades morfoestruturais que correspondem às grandes macroestruturas, como os escudos antigos, as faixas de dobramentos proterozóicos, as bacias paleomesozóicas e os dobramentos modernos. Essa unidade pode conter uma ou mais unidades morfoesculturais, associadas a diversidades litológico-estruturais, guardando evidências das intervenções climáticas na elaboração das grandes formas; 2<sup>o</sup> táxon: unidades morfoesculturais, que correspondem aos compartimentos gerados pela ação climática ao longo do tempo geológico, com intervenção dos processos tectogênicos. As unidades morfoesculturais são caracterizadas pelos planaltos, planícies e depressões, que estão inseridas numa unidade morfoestrutural; 3<sup>o</sup> táxon: unidades morfológicas, correspondentes ao agrupamento de formas relativas aos modelados, que são distinguidas pelas diferenças da rugosidade topográfica ou do índice de dissecação do relevo, bem como pelo formato dos topos, vertentes e vales de cada padrão. 4<sup>o</sup> táxon: corresponde à unidade de padrão de formas semelhantes. Estas formas podem ser: a) de agradação (acumulação), como as planícies fluviais ou marinhas, terraços; b) de degradação como colinas, morros e cristas. 5<sup>o</sup> táxon: corresponde aos tipos de vertentes ou setores das vertentes de cada uma das formas do relevo. Cada tipologia de forma de uma vertente é geneticamente distinta; cada um dos setores dessa vertente pode apresentar características geométricas, genéticas e dinâmicas também distintas. 6<sup>o</sup> táxon: refere-se às formas menores resultantes da ação dos processos erosivos atuais ou dos depósitos atuais (ROSS, 2003).

Nos estudos geomorfológicos, a fragilidade ambiental vem ganhando destaque nos últimos anos, devido ao resultado final, geralmente uma carta síntese.

De acordo com Ross (2001):

Os estudos integrados de um determinado território pressupõem o entendimento da dinâmica de funcionamento do ambiente natural com ou sem as intervenções humanas. Assim sendo, a elaboração do Zoneamento Ambiental deve partir da adoção de uma metodologia de trabalho baseada na compreensão das características e da dinâmica do ambiente natural e do meio sócio econômico, visando buscar a integração das diversas disciplinas científicas específicas por meio de uma síntese do conhecimento acerca da realidade pesquisada. Nesta direção o mapeamento das unidades de paisagens identificadas sob a perspectiva de suas fragilidades frente às condições materiais e possíveis intervenções humanas é de valiosa importância. A funcionalidade dos ambientes naturais é alterada pelas ações humanas e comandada, de um lado, pela energia solar através da atmosfera e, por outro lado a energia do interior da terra através da litosfera. Aliada a esses pressupostos naturais, é cada vez mais significativa a ação humana, que, ao se apropriar do território e de seus recursos naturais, causa grandes alterações na paisagem natural com um ritmo muito mais intenso que aquele que normalmente a natureza imprime no meio (ROSS, 2001).

O mesmo autor (1994) a partir do conceito de unidades ecodinâmicas, passou a considerar que:

A potencialidade dos ambientes naturais e antropizados como definidora das fragilidades ambientais não mais as separando em Emergente e potencial. Levando-se em consideração que por mais intocado que esteja um ambiente sempre está sendo indiretamente afetado pela ação antrópica, seja pela poluição do ar, seja pelas águas subterrâneas, entre outros (ROSS, 2001).

A avaliação de fragilidade ambiental de uma área engloba a valoração de alguns dos atributos e características apresentados pelo ecossistema, a princípio de forma isolada e, a posteriori, integradamente, possibilitando que se obtenha uma percepção do conjunto (GUAPYASSSÚ & HARDT, 1998).

Kawakubo *et al.* (2005) definiu a fragilidade potencial e a fragilidade ambiental:

A fragilidade potencial de uma área pode ser definida como a vulnerabilidade natural que um ambiente apresenta em função de suas características físicas como a declividade e o tipo de solo, já a fragilidade ambiental considera, além das características físicas, os graus de proteção que os diferentes tipos de uso e cobertura vegetal exercem sobre o ambiente (KAWAKUBO *et al.*, 2005).

Na carta síntese de fragilidade ambiental, é possível visualizar as fragilidades muito baixa ou nula, baixa, média, forte e muito forte, podendo ser utilizada nos estudos de diagnósticos da erosão urbana e rural.

A erosão é considerada um processo natural de degradação dos solos. Porém, a interferência antrópica pode acelerar esse processo, causando uma rápida evolução, dando origem, assim, às voçorocas que de acordo com Neboit (1983, *in* Oliveira, 1999), o termo voçoroca vem sendo associado à erosão acelerada dos solos, derivando da concepção de que ravinas e voçorocas resultam da intervenção causada pela atividade humana.

De acordo com Oliveira (1999), a erosão por voçoroca é causada por vários mecanismos que atuam em diferentes escalas temporais e espaciais, podendo ser entendidas por: deslocamentos de partículas, transporte por escoamento superficial difuso, transporte por fluxos concentrados, erosão por quedas d'água, solapamentos, liquefação, movimentos de massa e arraste de partículas.

A ocorrência dos processos erosivos envolve uma série de fatores que segundo Guerra (1998), determinam as variações nas taxas de erosão e podem ser subdivididos em: erosividade (causada pela chuva), erodibilidade (proporcionada pelas propriedades dos solos), características das encostas e natureza vegetal.

No Brasil, vários trabalhos sobre início e desenvolvimento de processos erosivos vêm sendo desenvolvidos em diversas cidades do país, como por exemplo: em Manaus – Amazonas (VIEIRA *et al.*, 2002); em Natal e Parnamirim – Rio Grande do Norte (RAMALHO, 1999); em Barreiras – Bahia (ANDRADE *et al.*, 2002); em

Recife – Pernambuco (SILVA & GUERRA, 2002); Uberlândia – Minas Gerais (ALVES *et al.*, 2002; BEZERRA, 2006); em Petrópolis - Rio de Janeiro (GONÇALVES & GUERRA, 2001); em Macaé – Rio de Janeiro (LIMA *et al.*, 2008); em Goiânia - Goiás (SOUSA, 2002); em Sorriso – Mato Grosso (ALMEIDA & GUERRA, 2001; LOUREIRO *et al.*, 2008); em São Luís – Maranhão (MENDES *et al.*, 2008; BEZERRA *et al.*, 2009; GUERRA *et al.*, 2009; SATHLER, 2010) entre outros, evidenciando a preocupação de estudiosos e profissionais com a problemática dos processos erosivos.

As áreas degradadas, segundo Morgan (1981), podem ser definidas como a perda da produtividade da terra, quantitativamente ou qualitativamente, através de vários processos como erosão, ação eólica, salinização, diminuição dos nutrientes, deteriorização da estrutura do solo e poluição. A perda da produtividade pode ser parcial ou total. Os danos causados pela degradação de terras são primeiramente analisados em relação aos aspectos físicos do ambiente, como solo, relevo e clima. Outro aspecto muito importante no processo de degradação é a ação antrópica.

O conhecimento sobre os mecanismos de remoção e transporte das partículas do solo pelo *splash*, escoamento superficial e o vento, deve ser considerado dentro de uma estratégia para na conservação dos solos, baseado na sua proteção contra o impacto das gotas da chuva, aumento na capacidade de infiltração para redução do escoamento superficial; melhorando a estabilidade dos agregados do solo, e aumentando a rugosidade da superfície para reduzir a velocidade do escoamento e do vento (MORGAN, 1995).

De acordo com Salomão (1999), a adoção de medidas efetivas de controle preventivo e corretivo da erosão depende da dinâmica de funcionamento hídrico sobre o terreno, devendo considerar também a dinâmica do uso do solo, suas

propriedades físicas e químicas, bem como as condições climáticas, em áreas urbanas, em especial a interferência antrópica.

Em se tratando das terminologias recuperação, reabilitação, restauração de áreas degradadas, serão utilizados os conceitos empregados por Costa *et al.*, (2005). Segundo esses autores (2005):

**Recuperação** – significa dizer que “o sítio degradado será retornado a uma forma de utilização de acordo com o plano preestabelecido para o uso do solo. Implica que uma condição estável será obtida em conformidade com os valores ambientais, estéticos e sociais da circunvizinhança. Significa, também, que o sítio degradado terá condições mínimas de estabelecer um novo equilíbrio dinâmico, desenvolvendo um novo solo e uma nova paisagem”; **Reabilitação** – “retorno da área a um estado biológico apropriado. Esse retorno pode significar o uso produtivo da área a longo prazo, com a implantação de uma atividade que renderá lucro; ou atividades menos tangíveis em termos monetários, visando a recreação ou a valorização estético-ecológica”; **Restauração** – “é o termo mais impróprio a ser utilizado para os processos que normalmente são executados, pois esse conceito refere-se à obrigatoriedade ao retorno do estado original da área, antes da degradação. Por retorno ao estado original entende-se que todos os aspectos relacionados com topografia, vegetação, fauna, solo, hidrologia, etc. apresentem as mesmas características de antes da degradação. Ou seja, trata-se de um objetivo praticamente inatingível” (COSTA *et al.*, 2005).

Apresentados esses conceitos, defende-se a terminologia de reabilitação de áreas degradadas para o caso da voçoroca do bairro do Sacavém, município de São Luís, pois se espera o retorno a um estado biológico apropriado, e mais tarde, a reutilização dessa área para as comunidades circunvizinhas.

As medidas de reabilitação das encostas afetadas pela erosão dos solos e pelos movimentos de massa devem levar em conta os processos geomorfológicos que causaram esses impactos, bem como as características hidrológicas, geológicas e a interferência antrópica. Quando às técnicas de reabilitação adotadas atuam sobre a consequência, sem averiguar quais as causas que deram origem a um determinado impacto numa encosta, podem ter insucessos (GUERRA, 2003; ARAÚJO *et al.*, 2005).

Outro motivo de insucesso nos trabalhos de reabilitação de áreas degradadas, principalmente em áreas urbanas, está relacionado ao não envolvimento da população local nas fases de inserção do projeto. Nesse sentido, a implantação de um Programa de Educação Ambiental na comunidade, atingindo as diferentes faixas etárias, pode viabilizar e facilitar os trabalhos (CÂNDICE *et al.*, 2004; BEZERRA, 2006; SMETS & POESEN, 2009; BHATTACHARYYA, 2010).

Para Reigota (2002) a Educação Ambiental deve procurar incentivar o indivíduo a participar ativamente da resolução dos problemas no seu contexto de realidades específicas. Na mesma direção, Dias (2006) considera que a atuação do projeto em parceria com a comunidade, objetiva um processo contínuo de Educação Ambiental, para que os resultados obtidos não tenham caráter meramente imediatista e pontual. Estes devem proporcionar a todas as pessoas a possibilidade de adquirir conhecimentos, o sentido dos valores, o interesse ativo e atitudes necessárias, para proteger e melhorar a qualidade ambiental.

Procura-se também despertar nos indivíduos, o espírito analítico, sensível, criativo e solidário, na tentativa de valorizar as potencialidades de cada um. Sato (2004) chama atenção para o fato de a Educação Ambiental ser capaz de “gerar, com urgência, mudanças na qualidade de vida e maior consciência de conduta pessoal [...]”.

Sobre qualidade ambiental vinculada ao processo educacional, Reigota (2002) discorre acertadamente quando faz a seguinte afirmativa:

Parece-me extremamente importante que as questões ambientais passem a fazer parte do cotidiano e do processo de formação das classes operária e popular, não apenas para preservar a natureza, mas sim para que todos se conscientizem da importância do meio ambiente saudável na sua particularidade e amplitude, considerando que todo cidadão tem o direito de viver e trabalhar em condições ambientalmente dignas (REIGOTA, 2002).

A cidadania é um assunto que deve ser tratado como ponto de relevante interesse para a Educação Ambiental, uma vez que contribui para a formação do cidadão e respectivamente ressalta sua posição política, necessária ao despertar do senso crítico dos indivíduos e da coletividade envolvida. Para Loureiro (2005), a cidadania pode ser assumida como “algo que se constrói permanentemente, que não possui origem divina ou natural, nem é fornecida por governantes, mas se constitui ao dar significado ao pertencimento do indivíduo a uma sociedade”. Percebe-se claramente a importância da inserção de um Programa de Educação Ambiental na reabilitação de áreas degradadas por voçorocamento, bem como o entendimento dos processos geomorfológicos.

O conhecimento geomorfológico associado a técnicas de contenção, tal como a bioengenharia de solos, vem contribuindo no controle e recuperação de processos erosivos em alta escala. Segundo Lekha (2003), os geotêxteis protegem as sementes e o solo até a encosta ficar estabilizada com a cobertura vegetal, formando uma proteção entre as partículas do solo e as águas das chuvas, minimizando o escoamento superficial e sua velocidade, mantendo a capacidade do solo de absorver água.

A bioengenharia possui alguns princípios de estabilização dos processos erosivos, de acordo com a Deflor (2005):

Os sistemas biotécnicos usam componentes da vegetação (sozinho ou combinação); os sistemas são resistentes e aumentam ao longo do tempo (resistem a chuvas pesadas, protege o solo, absorção do impacto da gota de chuva); em um sistema biotécnico de estabilização do solo, a planta pode fornecer os componentes estruturais e vegetativos, podendo-se utilizar espécies vegetais da região; os sistemas biotécnicos são úteis na estabilização do talude de pequena profundidade; pode-se planejar a aplicação da técnica no período chuvoso (úmido) para o estabelecimento da vegetação ou planejar a irrigação no período seco; são apropriados para áreas de reserva botânica e parques, pois caracteriza-se pelo acesso mínimo de equipamentos (DEFLOR, 2005).

De acordo com Fullen & Guerra (2002), os geotêxteis podem garantir benefícios para o desenvolvimento de determinadas regiões, devido à:

Disponibilidade de matéria-prima; são sustentáveis, se corretamente explorados; a confecção da biotêxtil é simples, sem a necessidade de alto desperdício de energia; geração de empregos para a população rural; são biodegradáveis, podendo aumentar a fertilidade e matéria orgânica no solo; controlam processos erosivos, “imitando” as propriedades da cobertura vegetal; estimulam um extrativismo sustentável; estimulam o reflorestamento e a exportação para outros países (FULLEN & GUERRA, 2002).

Sobre os geossintéticos Pereira & Coelho (2008) *apud* Couto *et al.* (2010), consideraram que:

Especialistas de controle de erosão têm se referido aos geossintéticos como Produtos em Rolo para Controle de Erosão (PRCEs), que podem ser classificados em degradáveis ou não degradáveis. No Brasil os PRCEs são também chamados de biomantas antierosivas. As primeiras biomantas foram desenvolvidas nos Estados Unidos, utilizando-se fibras de juta. Atualmente esses produtos são manufaturados a partir das mais diversas matérias-primas, como algodão, fibra de coco beneficiada, sisal, turfa, trigo, milho e palhada composta por restos de culturas agrícolas. As biomantas normalmente são tecidas em material sintético, composto por polipropileno, polietileno, náilon e outros compostos utilizados no amarrimento dos resíduos vegetais (PEREIRA & COELHO 2008 *apud* COUTO *et al.*, 2010).

As características básicas das biomantas biodegradáveis são segundo Couto *et al.* (2010):

- **Permeabilidade:** são permeáveis por serem constituídas de materiais fibrosos desidratados e por permitirem absorver teores de umidade até quatro vezes superior ao peso do produto seco. Desta forma, os sedimentos são retidos e, ou, ancorados, contribuindo para controlar e impedir avanços dos processos erosivos, mantêm a umidade e servem como substrato para o desenvolvimento de vegetais. Favorecem a infiltração de água no solo através da melhoria de suas condições físico-químicas, devido aos efeitos imediatos de proteção contra a insolação e evapotranspiração, o que permite plantar em épocas de estiagem (COUTO *et al.*, 2010).

- **Isolamento:** eliminam a emissão de particulados para a atmosfera em casos de solos com estruturação deficiente, compostos de material sujeito ao carreamento eólico como dunas instáveis, áreas de disposição de rejeitos industriais, minerações, dentre outras, preferencialmente em sinergismo com a revegetação destes locais; reduzem também os danos por ocorrência de geadas pelo efeito de isolamento térmico proporcionado pelas biomantas biodegradáveis (COUTO *et al.*, 2010).
- **Proteção superficial do solo:** reduzem o escoamento superficial da água por atuarem como dissipadores de energia do escoamento superficial, já que ao manterem contato direto com o solo fornecem obstáculo ao escoamento, reduzindo a velocidade do escoamento superficial, eliminando a ação erosiva deste; reduzem a erosividade da chuva, uma vez que o impacto das gotas de chuva (*raindrop impact*) é responsável, em alguns casos, por até 98% dos processos de mobilização de sedimentos; evitam o carreamento de vegetação em margens de canais durante inundações, garantindo que a vegetação permaneça fixada ao solo, podendo-se ajustar os diferentes modelos de biomantas biodegradáveis de acordo com o regime hídrico do curso d'água no qual serão instaladas (COUTO *et al.*, 2010).
- **Aumento da capacidade de troca catiônica do solo:** a capacidade de troca catiônica do solo é sensivelmente aumentada com a utilização das biomantas biodegradáveis, por ocasião de sua degradação. Com a mineralização da matéria orgânica, ocorre a formação de substâncias húmicas, que colaboram para o aumento da superfície específica do solo, elevando a capacidade de retenção e o posterior fornecimento de nutrientes para as plantas (COUTO *et al.*, 2010).
- **Integração ambiental:** são 100% degradáveis e apresentam perfeita harmonia com o meio ambiente; imediatamente após sua instalação nota-se sensível melhora no aspecto visual. Possuem degradação programável. Em situações de risco, na qual a ausência temporária de vegetação poderá causar danos consideráveis, por exemplo, devem-se utilizar biomantas biodegradáveis de degradação lenta e gramatura elevada, assim como em locais menos exigentes poderá ser utilizada a tela biodegradável de decomposição rápida e gramatura baixa; a mineralização da matéria orgânica constituinte das biomantas favorece a coesão entre as partículas minerais do solo, melhorando a estruturação e, por conseguinte, reduzindo a erodibilidade do solo (COUTO *et al.*, 2010).
- **Flexibilidade e praticidade:** facilmente moldáveis, possuem grande flexibilidade para se adaptarem às mais diversas situações, são de fácil manuseio, leves e práticas, podendo ser aplicadas em locais de difícil acesso e em encostas íngremes, sem necessidade de equipamentos sofisticados. Apresentam formas, dimensões, comprimento e diâmetro variáveis e moldáveis à qualquer situação (COUTO *et al.*, 2010).
- **Baixo custo:** apresentam custos baixos comparados aos das técnicas, dos produtos e dos processos convencionais da engenharia, por serem constituídas de materiais fibrosos e resíduos de culturas agrícolas (COUTO *et al.*, 2010).

Em relação à biodegradabilidade, as características das fibras vegetais utilizadas irão influenciar o tempo da degradação dos geotêxteis biodegradáveis quando aplicados sobre o solo, nesse caso, as características físico-químicas das fibras provenientes das palmeiras.

As palmeiras são plantas Monocotiledôneas da família das palmáceas (*Palmaceae* ou *Palmae* na Nomenclatura técnica). São representadas por cerca de 3.500 espécies reunidas em mais de 240 gêneros (LORENZI *et al.*, 1996).

Estando entre as plantas mais antigas do globo, as palmeiras ocorrem, principalmente, nas regiões tropicais, sendo as plantas mais características dessa região. De modo geral, são consideradas de grande importância econômica pela variedade de produtos que oferecem.

Além do grande interesse para o paisagismo, muitas palmeiras oferecem produtos comestíveis como a polpa e o óleo vegetal. Os troncos e as folhas de algumas espécies são utilizados para fins diversos como construção de casas e artesanato.

No Brasil, a chamada Zona dos Cocais abrange extensas regiões do Norte e Nordeste em direção ao Centro, caracterizando-se pelos babaçuais, carnaubais e em direção ao Oeste os carandasais (LORENZI *et al.*, 1996).

No Maranhão, há, em média, a incidência de vinte espécies nativas (LORENZI *et al.*, 1996), destacando-se: o babaçu (*Attalea speciosa*); o buriti (*Mauritia flexuosa*) e a juçara (*Euterpe oleracea*). Além destas, existem outras como a macaúba (*Acrocomia aculcata*); o tucumã (*Astrocaryum vulgare*) e a carnaúba (*Copernicia prunifera*).

Seguindo o modelo extrativista, algumas palmeiras já tiveram importância econômica muito maior no Brasil, como o babaçu e a carnaúba utilizadas, respectivamente, na exploração do óleo e da cera, que pelo desenvolvimento de produtos sintéticos e do aparecimento de novas espécies cultivadas, deixaram de ter importância econômica nas regiões em que ocorrem (PEREIRA *et al.*, 2003). Nesta pesquisa foram utilizadas as fibras das palmeiras do buriti para produção dos geotêxteis.

A degradação da fibra do buriti depende dos seguintes fatores segundo as considerações de Tauk (1990):

Condições locais e regionais como clima, tipo de solo, vegetação, fauna e microrganismos decompositores. A diversidade bioquímica de substratos macromoleculares indica que os organismos devem possuir amplo espectro de enzimas extracelulares. As propriedades do solo, tais como, argila, pH, matéria orgânica, tensão de água e aeração atuam como fatores ambientais no processo de decomposição (TAUK, 1990).

O índice de cobertura vegetal na estação experimental foi obtido com fotografias digitais terrestres. Segundo Fahsi (2002) *apud* Santos (2004):

As fotografias podem ser classificadas em terrestres e aéreas, de acordo com a localização da câmera no espaço. Se ela estiver posicionada em alguma plataforma diretamente em contato com o chão, fotos terrestres são obtidas, normalmente oblíquas ou horizontais, já que o eixo da câmera fica situado em uma angulação de quase 90° em relação ao eixo vertical. As fotografias aéreas, dependendo de sua inclinação em relação ao eixo perpendicular ao terreno podem ser subdivididas em verticais e oblíquas (FAHSI, 2002 *apud* SANTOS, 2004).

A cobertura vegetal da Terra é a superfície onde ocorre a interação entre a energia que atinge a crosta terrestre e a energia captada pelo sensor. Desta forma, uma imagem de sensoriamento remoto representa primeiramente, as características da vegetação que cobre a porção imageada da superfície da Terra. Com base nisto, foram desenvolvidos muitos estudos sobre a utilização destas imagens para a

identificação e caracterização dos diferentes tipos de cobertura vegetal encontrados na superfície do planeta. Um dos principais tipos de imagem obtidos por técnicas de processamento digital de imagens de sensoriamento remoto são os índices de vegetação.

Em relação ao tipo de resolução, Rosalen (1997) *apud* Santos (2004) considera os seguintes tipos de fotografias digitais: A resolução espacial e resolução radiométrica.

A resolução espacial refere-se à quantidade de pixels ou pontos (dots) existentes em uma certa unidade de medida (polegadas – inch ou milímetros – mm) e pode ser expressa em dpi (*dots per inch*) ou dpmm (*dots per millimeter*). Uma resolução melhor implica em uma maior quantidade de pixels presentes na medida. A resolução radiométrica refere-se aos tipos de cores que podem existir em cada pixel. Quanto melhor a resolução radiométrica, maior será a quantidade de bits necessária para representar as cores de pixels, gerando imagens com um tamanho maior em bytes na memória (ROSALEN, 1997 *apud* SANTOS, 2004).

A classificação de objetos ou fenômenos é realizada por meio de sua principal característica (diferentes cores que podem representar uma represa, vegetação, rios, cidade etc.) que o descrevem para diferenciá-lo entre si. Os métodos de classificação podem ser compreendidos em dois grupos: a classificação supervisionada e a não-supervisionada (SULSOFT, 2004).

Nesta pesquisa, utilizou-se a classificação supervisionada, que segundo a SulSoft, (2004), “tem como princípio básico o uso de algoritmos para se determinar os pixels que representam valores de reflexão características para uma determinada classe”. Esta empresa (2004) considera as seguintes etapas de uma classificação supervisionada: 1. Definição das classes na qual a imagem vai ser dividida; 2. A escolha da amostra de treinamento da cada classe; 3. Aplicação de um algoritmo de classificação em que todos os pixels são classificados.

O método estatístico escolhido para a classificação supervisionada na pesquisa foi o método Maximum Likelihood, que segundo SulSoft, (2004), tem como princípio básico a seguinte linha de raciocínio: uma classificação errada de um pixel particular não tem mais significado do que a classificação errada de qualquer outro pixel na imagem.

Quanto à cobertura vegetal utilizada na estação experimental e na reabilitação da voçoroca do Sacavém, de acordo como as considerações de Crispim & Branco (2002):

Os capins do gênero *Brachiaria* possuem cerca de 90 espécies, comumente chamados de braquiária, têm distribuição marcadamente tropical, tendo como centro de origem primário a África Equatorial. No Brasil, como forrageira é conhecida desde a década de 1950. Conta-se que as braquiárias entraram no Brasil juntamente com os escravos, pois serviam de colchão nos navios negreiros. As gramíneas do gênero *Brachiaria* são largamente utilizadas em pastagens na América Tropical. As braquiárias são os capins mais plantados no país, sendo utilizados nas fases de cria, recria e engorda dos animais (CRISPIM & BRANCO, 2002).

A biodegradação dos geotêxteis e desenvolvimento da cobertura vegetal no experimento contribuem para manter a umidade no solo, e conseqüentemente, fornece matéria orgânica, implicando na estabilidade dos agregados.

O conhecimento sobre a dinâmica subsuperficial da água no solo constitui uma importante ferramenta no processo de identificação, análise e reabilitação de áreas degradadas por erosão. A dinâmica interna da água no solo revela uma relação de diversos fatores que controlam o componente hídrico, como o clima, propriedades físicas do solo, tensão, sistema radicular da vegetação, macro e micro fauna e uso do solo.

Essa dinâmica pode ser entendida a partir do potencial matricial da água no solo, definida segundo Reichardt (1985) como o resultado de forças capilares e de adsorção que surgem devido à interação entre a água e as partículas sólidas, isto é, a matriz do solo. Essas forças atraem e fixam a água no solo, diminuindo sua energia potencial com relação à água livre. São fenômenos capilares que resultam da tensão superficial da água e de seu ângulo de contato com as partículas sólidas.

Dentre os instrumentos utilizados para a medição do potencial matricial, destaca-se o uso de tensiômetros (Figura 2), que segundo Azevedo & Silva (1999):

O tensiômetro consiste em uma cápsula porosa, geralmente de cerâmica ou porcelana, conectada a um medidor de vácuo (que pode ser um vacuômetro metálico ou um manômetro de mercúrio) através de um tubo plástico ou de outro material, tendo todas as partes preenchidas com água. A cápsula porosa é permeável à água e aos solutos na solução do solo, sendo, entretanto, impermeável a gases e à matriz do solo, até determinado nível de tensão (AZEVEDO & SILVA, 1999).

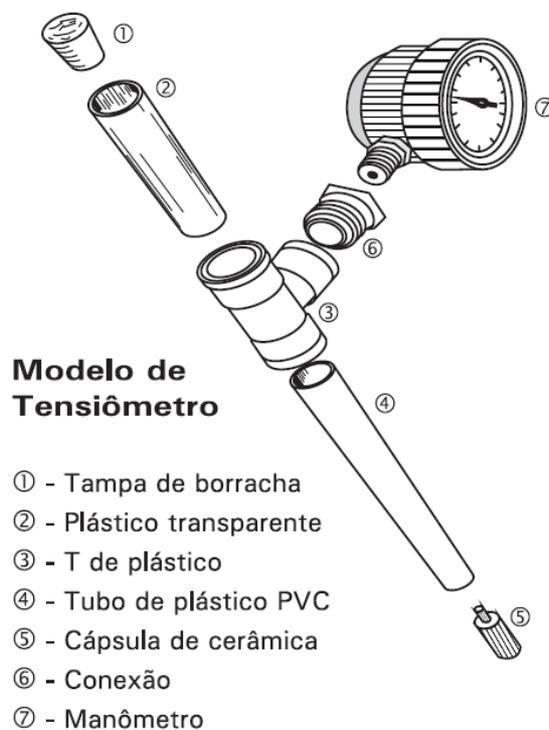


Figura 2 - Vista em perspectiva e partes componentes de um tensiômetro munido de vacuômetro metálico. Fonte: Azevedo *et al.* (1983) apud Azevedo & Silva (1999).

A umidade exerce outra importância fundamental no solo, uma vez que fornece água para atender às exigências de evapotranspiração dos vegetais em crescimento, fornece água para o lençol freático e constituem a solução do solo. Uma das principais características dos solos é a retenção de água durante um determinado tempo. Essa água é essencial para a vida das plantas, e sua reposição é realizada pelas chuvas ou irrigação. Ela pode estar concentrada entre os macroporos, microporos ou agregados (LEPSCH, 1993).

Os pinos de erosão são uma outra técnica barata e simples de se monitorar o processo erosivo (Figura 3), relacionado, nesse caso, ao escoamento superficial difuso, que provoca erosão em lençol (GUERRA, 2005). O mesmo autor (2005) explica detalhadamente o procedimento para instalação e o monitoramento dos pinos de erosão:

Basta escolher uma encosta (de preferência sem cobertura vegetal) e cravar no solo os pinos numerados (que podem ser de vergalhão ou pregos). Tudo deve ser plotado num diagrama, para se saber exatamente a sua distribuição espacial. O monitoramento dos pinos de erosão consiste em voltar à área de estudo (de preferência após cada evento chuvoso significativo) e medir o quanto o pino está ficando exposto em relação ao solo (as medidas podem ser feitas em milímetros). Esses pinos devem estar enterrados no solo a 10 centímetros ou mais, de preferência em encostas onde não haja passagem de animais e pessoas, ou então, a área deve ser cercada para que não haja nenhum tipo de perturbação. Após um tempo determinado (um ou dois anos, por exemplo), é possível verificar a taxa de rebaixamento do solo pelos dos pinos instalados e monitorados (pelo menos uns 50 pinos numa porção da encosta é aconselhável) (GUERRA, 2005).

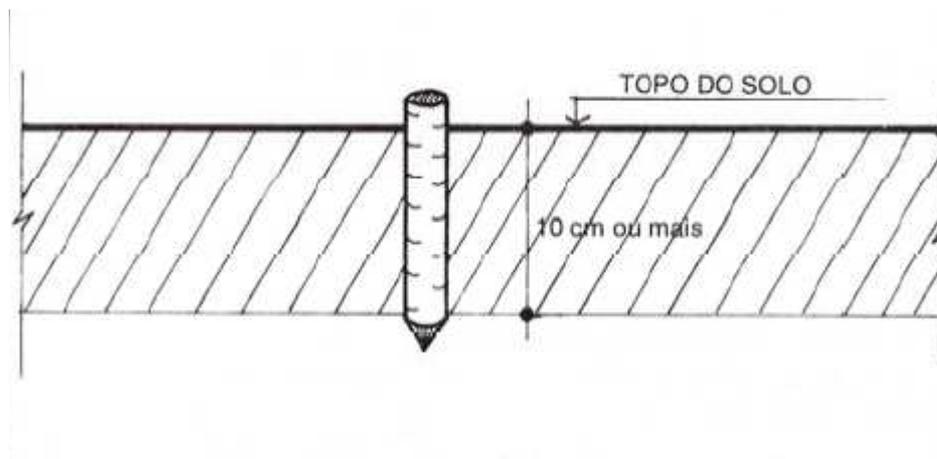


Figura 3 - Pino de erosão visto em perfil. Fonte: Guerra (2002) apud Guerra (2005).

A espectrometria de fluorescência de raios X (FRX ou XRF) pode ser utilizada na caracterização dos parâmetros físico-químicos do solo, constituindo assim, de grande importância nos estudos ambientais, principalmente na identificação dos macronutrientes, que são essenciais nos projetos de reabilitação de áreas degradadas. Segundo Enzweiler (2010), a espectrometria de fluorescência de raios X pode ser definida como:

A espectrometria de fluorescência de raios X é uma das técnicas analíticas mais utilizadas em geoquímica. A indústria mineral, tanto de exploração como de beneficiamento também utiliza amplamente a fluorescência de raios X, especialmente para fins de controle de processo. As aplicações principais em geoquímica são as determinações de elementos maiores, menores e traços em rochas, solos e sedimentos. Dentre os elementos-traços, os mais favoráveis à determinação por FRX, em função de limites de detecção e abundância crustal, são Ba, Ce, Cr, Cu, Ga, La, Nb, Ni, Pb, Rb, Sc, Sr, Th, V, Y, Zn, Zr. Os resultados da XRF sempre são de concentrações elementares totais (ENZWEILER, 2010).

A mesma autora (2010) ressalta a importância e o funcionamento da técnica de fluorescência de raios X:

Um dos principais atrativos da XRF é a relativa simplicidade de preparação da amostras já pulverizadas. A fusão das amostras com fundentes e o posterior resfriamento produz vidros. Esta forma de homogeneização da amostra facilita a determinação de elementos maiores e menores (Na, Mg, Al, Si, P, K, Ca, Ti, Mn, Fe). A preparação direta de pastilhas prensadas a partir da amostras pulverizadas também é muito usada, mas encontra aplicação mais freqüente na determinação de elemento-traço. Os limites de detecção da XRF convencional, da ordem de alguns até dezenas de ppm, não são uniformes para todos os elementos. Elementos leves ( $Z < 10$ ) não são analisados na XRF convencional e a baixa concentração de muitos elementos-traço (p.ex., metais nobres) em amostras geológicas comuns impede a sua determinação por esta técnica. A fluorescência de raios X dos elementos presentes numa amostra ocorre quando esta é atingida por raios X oriundos de um tubo de raios X. Ao incidirem nos átomos da amostra, esses raios X primários ejetam elétrons das camadas próximas do núcleo (ENZWEILER, 2010).

As análises granulométricas constituem uma importante análise nos estudos sobre os processos erosivos. A textura do solo caracteriza-se pela proporção relativa das classes de tamanho de partículas de um solo. A Sociedade Brasileira de Ciência do Solo considera quatro classes de tamanho de partículas menores do que 2 mm, usadas para a definição da classe de textura dos solos: Areia grossa – 2 a 0,2 mm ou 2000 a 200  $\mu\text{m}$ ; Areia fina – 0,2 a 0,05 mm ou 200 a 50  $\mu\text{m}$ ; Silte – 0,05 a 0,002 mm ou 50 a 2  $\mu\text{m}$ ; Argila – menor do que 2  $\mu\text{m}$  (DALVAN & REICHERT, 2006).

Algumas pesquisas utilizam o diagrama triangular como forma de apresentação da textura dos solos. Segundo Bormann (2010):

Em diferentes regiões do mundo, diferentes sistemas de classificação de textura dos solos foram desenvolvidos. Esses diferentes sistemas de classificação dividem o diagrama triangular em diferentes classes texturais. O sistema alemão de classificação dos solos, por exemplo, é dominado pelos limites das classes verticais e horizontais, enquanto que a classificação australiana é construída pelos limites das classes diagonais, predominantemente. Nos sistemas Americano e Canadenses, os limites das classes diagonais, verticais e horizontais são similares. Uma comparação entre esses diferentes sistemas de classificação tem que levar em consideração que alguns limites do tamanho do grão se diferencia entre os sistemas. Por exemplo, as frações silte e areia não são definidas da mesma maneira nos Estados Unidos e outros sistemas internacionais (Como por exemplo, o australiano e alemão), causando problemas de transferibilidade (BORMANN, 2010).

## 6. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

As análises de campo e de laboratório foram fundamentadas nos estudos de Feitosa (1989, 1996, 2006), Maranhão (1998), Sutherland (1998a, 1998b), Embrapa (1997, 1999), Guerra (1990, 1996, 1999, 2003, 2005), Ross (1991, 1992), Azevedo & Silva, 1999, Baccaro *et al.* (1999), Poesen *et al.* (1999), Rodrigues e Brito (2000), Veiga Júnior (2000), Morgan (1981, 1995, 2001), Fullen & Guerra (2002), Kirkby *et al.* (2003), Lekha (2003), Spörl & Ross (2004), Azevedo *et al.* (2005), Bezerra (2006), Mendonça (2006), Sathler (2005), Pereira (2006), Soares Junior *et al.*, 2008, Smets *et al.* (2008, 2009), Silva & Rodrigues (2009), Smets & Poesen, (2009), Bhattacharyya *et al.* (2009), Bhattacharyya *et al.* (2010), Bhattacharyya (2010). Constaram de observações e mensurações de dados de campo relacionados com monitoramento das cabeceiras das voçorocas e das estações experimentais (Índice de cobertura vegetal, potencial matricial, pinos de erosão, escoamento superficial e perda de sedimentos). Essas bibliografias fundamentaram a reabilitação de um trecho da voçoroca do Sacavém, tendo como base a bioengenharia de solos, como também a mensuração dos índices pluviométricos, estudo da fragilidade ambiental, mapeamento geomorfológico e coletas de amostras de solos para análise laboratorial.

### 6.1. Levantamentos bibliográfico e cartográfico

Para a produção e evolução do conhecimento científico torna-se essencial o levantamento e análise do material bibliográfico que trata do assunto analisado e que fundamente a pesquisa. Dessa forma, foram pesquisados conteúdos relacionados à geomorfologia, mapeamento geomorfológico, bioengenharia de

solos, fragilidade ambiental, reabilitação de áreas degradadas por erosão, fluorescência de raios X, granulometria a laser, potencial matricial, pinos de erosão, escoamento superficial, erosão superficial, índice de cobertura vegetal, em diferentes fontes, como livros, artigos científicos, monografias, dissertações e teses.

A bibliografia foi levantada nas bibliotecas do Programa de Pós-graduação em Geografia - PPGG, no Centro de Ciências Matemáticas e da Natureza – CCMN e Laboratório de Geomorfologia e Erosão dos Solos – LAGESOLOS, da Universidade Federal do Rio de Janeiro; Núcleo de Estudo de Pesquisas Ambientais – NEPA, da Universidade Federal do Maranhão; e da Universidade de Wolverhampton (UK). Os artigos também foram adquiridos junto ao portal de periódicos da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES e diretamente nos endereços eletrônicos das principais revistas nacionais e internacionais sobre a temática do assunto.

O mapa de uso da terra foi elaborado a partir das imagens de satélite CBERS (Satélite Sino-Brasileiro de Recursos Terrestres), de 2008, na escala de 1:50.000 e fotografias aéreas de 1998, na escala de 1:8.000, disponibilizadas pela Companhia de Água e Esgoto do Maranhão – CAEMA e no site do Zoneamento Ecológico-Econômico do Estado do Maranhão. É importante ressaltar que as fotografias aéreas, na escala de 1:8.000, não cobrem completamente a área da bacia em estudo. Por esta razão, foram utilizadas somente as imagens CBERS para elaboração mapa de uso da terra, ficando as referidas fotografias aéreas, apenas para a identificação dos processos erosivos.

Para a elaboração dos mapas de declividade, hipsometria e geomorfológicos foram utilizadas as cartas da Diretoria do Serviço Geográfico do Ministério do Exército – DSG / ME, na escala de 1:10.000, com equidistância das curvas de nível de 5 m. A digitalização das cartas da DSG foi realizada com o *software* ARCGIS 9.3. O mapa de morfoestrutura e morfoescultura na escala de 1:860.000 foi adaptado com base nos estudos de Feitosa (1989, 1996, 2006), Maranhão (1998), Veiga Júnior (2000) e Soares Junior *et al.* (2008).

O mapa de distribuição dos índices pluviométricos na bacia do Bacanga foi elaborado a partir dos dados das estações meteorológicas da SUDENE (Superintendência de Desenvolvimento do Nordeste), da rede pluviométrica do DNAE (Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica), e Laboratório Meteorológico da Universidade Estadual do Maranhão, no período de 1971 a 1998, e 2003 a 2008, referentes às estações de São Luís, São José de Ribamar e Bacabeira. O mapa de solos e geologia da bacia foi produzido com os dados disponíveis sobre os solos e geologia da Ilha do Maranhão do Gerenciamento Costeiro, no relatório final do ano 1998. A nomenclatura dos solos foi adaptada para a atual classificação da EMBRAPA (1999). Os mapas temáticos foram apresentados e compatibilizados na escala de 1:80.000, sendo o *Datum* do produto final o *South America* 1969 (SAD 69).

## 6.2 Trabalho de campo

Os trabalhos de campos foram realizados na bacia do Bacanga, tendo como objetivo monitorar a evolução das cabeceiras da voçoroca do Sacavém, bem como a intervenção com técnicas de bioengenharia de solos para reabilitação da área. Essas atividades também possibilitaram a coleta de amostras de solos (Figuras 4, 5) para análise no laboratório (fluorescência de raio X, granulometria a laser), seleção da área para a construção da estação experimental, observação *in loco* da influência da ação antrópica sobre as unidades da paisagem, contato com a população atingida por esse tipo de degradação e registro fotográfico.



Figura 4 – Coleta das amostras na profundidade de 5 cm na parcela com solo exposto b. Foto: Bezerra, 2009.



Figura 5 – Amostras de solos superficiais (cinco cm) provenientes das parcelas com geotêxteis com gramíneas e solo exposto. Foto: Bezerra, 2009.

O monitoramento das voçorocas na área de estudo foi realizado segundo o método proposto por Guerra (1996), que utiliza: estacas colocadas ao redor da voçoroca; trena, para fazer as mensurações das distâncias das estacas até a borda da voçoroca e bússola de geólogo (Brunton), para se obter a orientação das medidas. Utilizou-se o papel milimetrado para visualizar a evolução das cebeceiras.

### 6.3 Elaboração dos mapas temáticos

Os mapas de localização e temáticos das diferentes unidades da paisagem na bacia do Bacanga foram elaborados com softwares de geoprocessamento, como descrito a seguir. O mapa de uso da terra foi produzido com o auxílio do programa Arcgis 9.3 e baseando-se na imagem CBERS, na escala de 1:50.000, por meio da

identificação dos grupos de pixels (região de interesse) que representam a cobertura arbórea (mangue e floresta secundária mista), vegetação de gramínea e arbustiva, área construída e corpos d'água. Depois da delimitação das regiões de interesse, utilizou-se a classificação supervisionada com o método estatístico *maximum likelihood* para a visualização das diferentes classes de uso da terra na bacia. O layout do mapa do uso da terra foi organizado no Arcgis 9.3.

As cartas da DSG nº 13, 21, 22, 23, 29, 30, 31, 38 e 39, na escala de 1:10.000, foram georreferenciadas e digitalizadas com o auxílio das ferramentas do software Arcgis 9.3. As curvas de nível (linha) e drenagem (linha e polígono) foram digitalizadas, e posteriormente processadas com a extensão 3D *Analyst*, resultando numa Rede Irregular Triangular (TIN), que é um Modelo Digital de Elevação (MDE). Através do TIN, foram produzidos os mapas de declividade, sombreamento hipsometria, essenciais na elaboração do mapa geomorfológico da bacia.

Os mapas de solos e geológico, na escala de 1:50.000, foram produzidos a partir do mapeamento pedológico e geológico da Ilha do Maranhão disponibilizados nos relatórios do GERCO (MARANHÃO, 1998). Estes mapas foram georreferenciados e digitalizados no programa Arcgis 9.3, sendo sobrepostas às informações coletadas na área da bacia do rio Bacanga. Quanto ao mapa de distribuição dos índices pluviométricos da bacia, este foi produzido a partir do cruzamento dos dados de precipitação em milímetro das três estações meteorológicas (São Luís, São José de Ribamar e Bacabeira) conforme já mencionado. O referido cruzamento foi realizado através do método estatístico da krigagem disponível na extensão *spatial analyst* do software Arcgis 9.3.

O índice de cobertura vegetal e os mapas de krigagem no experimento foram feitos através da classificação supervisionada, a partir das ferramentas

oferecidas pelo software Arcgis 9.3, na qual foi possível acompanhar o crescimento das gramíneas nas parcelas com geotêxteis, a evolução das áreas de erosão/deposição nas parcelas com solo exposto, e a distribuição da poro-pressão negativa no perfil do solo com base nos dados de potencial matricial. A taxa de crescimento da cobertura vegetal foi acompanhada semanalmente a partir de fotografias horizontais do mesmo ponto numa área de 1 m<sup>2</sup> nas parcelas com geotêxteis, com auxílio de uma máquina digital 4.0 mp, marca OLYMPUS.

#### 6.4 Educação ambiental e produção de geotêxteis

O programa de Educação Ambiental foi realizado no bairro da Salina/Sacavém, onde os processos erosivos acelerados, dentro da área da bacia do Bacanga, apresentam maiores riscos, tanto humanos como materiais. Tendo em vista a gravidade desse problema ambiental em face da população local, o projeto BORASSUS (através da União Européia), em parceria com universidades nacionais e internacionais, iniciou um projeto de reabilitação. Em âmbito nacional, as universidades encarregadas foram a Universidade Federal do Maranhão e a Universidade Federal do Rio de Janeiro.

Esse projeto viabilizou a reabilitação dessa área, sendo que todas as etapas necessárias para esse fim foram realizadas em parceria direta e constante com a comunidade desses bairros, através de um programa de Educação Ambiental. Junto com esse programa, foram promovidas oficinas de artesanato, com o objetivo de ensinar à população da comunidade a confecção manual dos geotêxteis biodegradáveis para a reabilitação do voçorocamento.

Os geotêxteis foram produzidos a partir da fibra do buriti (Palmeira do buriti – Figura 6), com o auxílio de agulha de saco (7 cm), madeirite (55 cm<sup>2</sup>), resultando numa biomanta de 50 cm<sup>2</sup> (Figura 7). As fibras são oriundas do Município de Barreirinhas, Estado do Maranhão, sendo as “sobras” das fibras utilizadas no artesanato local. A extração da fibra é realizada de forma sustentável e autorizada pelo Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis – IBAMA e tem o apoio do Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas – SEBRAE, que garante o sustento de algumas famílias da região. Foram produzidos 80 geotêxteis para a estação experimental e 3.000 geotêxteis para a reabilitação do trecho da voçoroca do Sacavém.



Figura 6 – Palmeira do buriti. Foto: Fernando Bezerra, 2003.

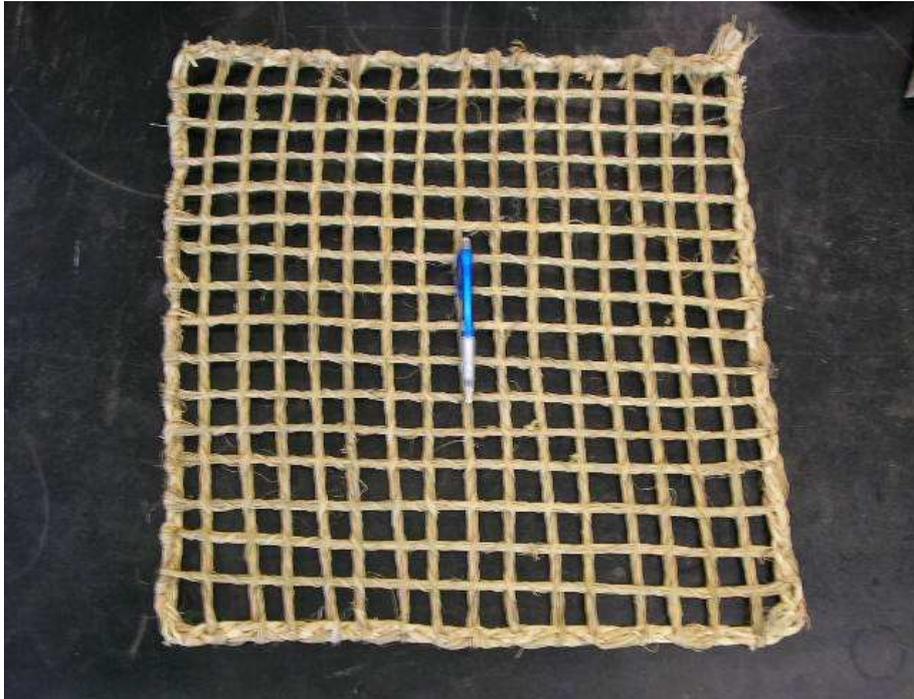


Figura 7 – Geotêxtil produzido com a fibra do buriti. Foto: Bezerra, 2006

Nessa perspectiva, acredita-se que a reabilitação da área degradada só teve sucesso mediante o envolvimento integral da comunidade no processo (Figuras 8, 9), sendo adotado como subsídio a essa finalidade a Educação Ambiental, como instrumento capaz de conduzir à sustentabilidade. No programa de Educação Ambiental foram realizadas oficinas com moradores de diferentes faixas etárias e registro fotográfico das etapas de trabalho. Nessas palestras foram explanados conceitos básicos sobre o ambiente, processos erosivos, lixo, preservação dos recursos naturais, saneamento básico e água, sempre relacionando o conteúdo com a realidade dos participantes.



Figura 8 – Participação da comunidade na produção dos geotêxteis. Foto: Fernando Bezerra, 2008.



Figura 9 – Participação da comunidade nos trabalhos de reabilitação do trecho da voçoroca do Sacavém. Foto: Fernando Bezerra, 2008.

## 6.5 Fragilidade ambiental

O mapa de fragilidade ambiental da bacia do Bacanga foi adaptado a partir da proposta metodológica de Ross (1991), sendo resultantes dos levantamentos básicos de geomorfologia (declividade), solos, cobertura vegetal / uso da terra e clima (índices pluviométricos). Segundo Ross (2004), esses elementos tratados de forma integrada possibilitam obter um diagnóstico das diferentes categorias hierárquicas da fragilidade dos ambientes naturais.

Segundo Ross (1991), esta metodologia pressupõe que cada um destes elementos da paisagem seja hierarquizada em cinco classes, de acordo com sua vulnerabilidade, sendo que as variáveis mais estáveis apresentarão valores mais próximos de 1,0, as intermediárias ao redor de 3,0 e as mais vulneráveis estarão próximas de 5,0 (Spörl e Ross, 2004).

Na bacia do rio Bacanga foram elaborados os mapas temáticos de declividade, uso da terra, pedologia, índices pluviométricos, com suas respectivas classes de vulnerabilidade, com o intuito de gerar a carta síntese de fragilidade.

Em relação às classes de declividade, Ross (1991) propõe a adoção de intervalos de classes já consagrados nos estudos de capacidade de Uso / Aptidão agrícola associados com aqueles conhecidos como valores críticos da geotecnia, que indicam sua influência nos processos erosivos e dos riscos de escorregamento / deslizamento. O referido intervalo de classes de declividade adotado pelo autor varia de: < 3%; 3 a 6%; 6 a 12%; 12 a 20%; 20 a 30%; 30 a 50%; e > 50%. Na área de estudo, foram adotados os intervalos de classe de declividade (Tabela 2) com base nos estudos de Feitosa (1989 e 1996).

Tabela 2 – Classes de fragilidade com respectivos pesos para bacia do rio Bacanga.

<b>Categorias</b>	<b>Classes</b>	<b>Pesos (categoria)</b>	<b>Pesos (classe)</b>
Solos	Área impermeabilizada (área urbana)	1	0,25 (25%)
	Argissolos Vermelho-Amarelo (Laterita)	4	
	Argissolos Vermelho-Amarelos	5	
	Neossolos regolíticos	5	
	Gleissolos	3	
	Neossolos Quartzarênicos	1	
Uso	Cobertura arbórea	1	0,35 (35%)
	Gramíneas (Áreas desmatadas)	4	
	Área construída	2	
Precipitação (mm)	2.097 – 2.127	3	0,20 (35%)
	2.128 - 2.149	4	
	2.150 – 2.179	5	
Declividade (%)	0 – 2	1	0,20 (10%)
	2 – 5	2	
	5 – 10	3	
	10 – 20	4	
	> 20	5	

1. Muito baixa, 2. Baixa, 3. Média, 4. Forte e 5. Muito Forte.

Adaptação: Bezerra, 2006.

A fragilidade dos solos na área da bacia do Bacanga foi determinada através dos estudos desenvolvidos por Maranhão (1998), na qual incluem as características de textura, grau de coesão das partículas e profundidade / espessura dos horizontes superficiais e subsuperficiais. As classes de fragilidade foram definidas tendo por base a tabela apresentada por Ross (1991), sendo posteriormente adaptada para a atual classificação dos solos da EMBRAPA (1999) (Tabela 3).

Tabela 3 – Classes de fragilidade dos solos.

<b>Classificação dos solos</b>	<b>Fragilidade</b>
Latossolo Roxo, Latossolo Vermelho Escuro e Vermelho Amarelo textura argilosa	1 - Muito baixa
Latossolo amarelo e Vermelho-amarelo textura médio-argilosa	2 - Baixa
Latossolo Vermelho-Amarelo, Terra Roxa, Terra Bruna, Podzólico Vermelho-Amarelo textura média/argilosa	3 - Média
Podzólico Vermelho-Amarelo textura média/arenosa, Cambissolos	4 - Alta
Podzólicos com cascalho, Litólicos e Areias Quartzosas	5 - Muito alta

Fonte: Ross, 1991.

A fragilidade do uso da terra e cobertura vegetal, na escala de 1:80.000, foi determinada com base nas fotografias aéreas, imagem de satélite, trabalhos de campo e gabinete, sendo delineadas as seguintes classes: arbórea, área construída e gramínea. Através dos estudos de Ross (1991) e Casseti (2005) sobre a fragilidade ambiental dos diversos usos da terra e cobertura vegetal foram estabelecidas as informações necessárias para a geração da carta síntese da bacia (Tabela 4).

Tabela 4 – Fragilidade ambiental dos diferentes usos da Terra / cobertura vegetal.

<b>Tipos de cobertura vegetal</b>	<b>Graus de Proteção</b>
Florestas, Matas Naturais, Florestas cultivadas com biodiversidade;	5 - Muito alta
Formações arbustivas naturais com extrato herbáceo denso, formações arbustivas densas (Mata secundária, Cerrado denso, Capoeira densa, Mata homogênea de Pinus densa, pastagens cultivadas com baixo pisoteio de gado, cultivo de ciclo longo como cacau)	4 – Alta
Cultivo de ciclo longo em curvas de nível/terraceamento como café, laranja com forrageiras entre ruas pastagens com baixo pisoteio, silvicultura de eucaliptos com sub-bosque de nativas	3 – Média
Culturas de ciclo longo de baixa densidade (café, pimenta do reino, laranja com solo exposto entre ruas), culturas de ciclo curto (cana-de-açúcar, soja, arroz, trigo, feijão, milho, algodão com cultivo em curvas de nível/terraceamento)	2 – Baixa
Áreas desmatadas e queimadas recentemente, solo exposto por arado/gradeação, solo exposto ao longo de caminhos e estradas, terraplenagens, cultivos de ciclo curto sem práticas conservacionistas.	1 - Muito baixa a nula

Fonte: Ross, 1991 e Casseti (2005)

As informações obtidas na tabela acima foram adaptadas para a bacia do Bacanga, sendo os dados referentes ao grau de proteção convertido em fragilidade, invertendo seus respectivos valores, com o intuito de homogeneizar os pesos atribuídos, bem como para uma melhor operacionalização da carta síntese junto ao *software* de geoprocessamento. Os usos e coberturas identificados na área com suas respectivas classes de fragilidade podem ser observados na tabela 2.

Os índices pluviométricos constituem outra importante etapa na elaboração da carta síntese de fragilidade ambiental da bacia, pois as chuvas são importantes agentes morfodinâmicos na modelagem do relevo terrestre, podendo intensificar o surgimento de processos erosivos, quando relacionada à alta erodibilidade e o precário manejo dos solos. Os dados de intensidade, frequência, distribuição no decorrer do ano são importantes fatores a serem considerados na produção desse trabalho. Levando em consideração os níveis de interferência da precipitação pluviométrica na estabilidade do ambiente, Ross (1991) estabeleceu os seguintes níveis hierárquicos, conforme a tabela 5.

Para a área de estudo, os dados de chuvas foram divididos em três classes (Tabela 2), devido às peculiaridades da bacia, tendo em vista também as chuvas concentradas durante o ano, o que vem a ser um agravante para o surgimento de processos de voçorocamentos. A diferença entre o intervalo selecionado, em áreas com alta erodibilidade, pode ocasionar o surgimento de processos erosivos acelerados, principalmente nas áreas identificadas com forte ou muito forte fragilidade ambiental.

Tabela 5 – Níveis hierárquicos das características pluviométricas.

<b>Características pluviométricas</b>	<b>Níveis hierárquicos</b>
Situação pluviométrica com distribuição regular ao longo do ano, com volumes anuais não muito superiores a 1000 mm/ano	1. Muito baixa ou nula
Situação pluviométrica com distribuição regular ao longo do ano, com volumes anuais não muito superiores a 2000 mm/ano	2. Baixa
Situação pluviométrica anual desigual, com períodos secos entre 2 e 3 meses no inverno, e no verão com maiores intensidades de dezembro a março com volumes anuais de aproximadamente 1500 mm/ano	3. Média
Situação pluviométrica com distribuição anual desigual, com período seco entre 3 e 6 meses, e alta concentração de chuvas no verão entre novembro e abril quando ocorrem de 70 a 80 % do total de chuvas com volumes anuais entre 1500 e 2000 mm/ano.	4. Forte
Situação pluviométrica com distribuição regular, ou não, ao longo do ano, com grandes volumes anuais ultrapassando 2500 mm/ano; ou ainda, comportamentos pluviométricos irregulares ao longo do ano, com episódios de chuvas de alta intensidade e volumes anuais baixos, geralmente abaixo de 900 mm/ano (semi-árido).	5. Muito Forte

Fonte: Ross, 1992.

## 6.6 Mapeamento geomorfológico

O mapeamento geomorfológico foi baseado na proposta da União Geomorfológica Internacional apresentada por Rodrigues e Brito (2000), bem como nos mapeamentos realizados na Ilha do Maranhão e Golfão Maranhense por Feitosa (1989, 1996, 2006), Maranhão (1998), Veiga Júnior (2000) e Soares Junior *et al.* (2008). Os trabalhos de campos e a análise das fotografias aéreas também contribuíram para elaboração do mapa.

De acordo com Rodrigues e Brito (2000), a União Geomorfológica Internacional recomenda que a cartografia geomorfológica deve apresentar quatro níveis de abordagem, abrangendo: a morfometria (altimetria, dimensões, desníveis, extensões); a morfologia (formas do perfil, concavidades, convexidades, retilineidades, rupturas, topos, fundos de vale, etc); a gênese (degradação ou agradiação); a cronologia relativa (idade relativa das formas, datação absoluta).

O mapeamento geomorfológico da bacia do rio Bacanga foi executado com o auxílio do *software* Arcgis 9.3, que possibilitou a digitalização das cartas topográficas, elaboração dos mapas de declividade, hipsométrico e o geomorfológico, bem como o cálculo de área em percentagem e km<sup>2</sup>. O mapeamento geomorfológico foi baseado na análise qualitativa dos parâmetros morfométricos e morfologia, tais como a declividade, altimetria, perfil topográfico.

Para a área do Golfão Maranhense, os procedimentos metodológicos empregados valorizam as análises das morfoestruturas e morfoesculturas, utilizando como base os dados SRTM - (*Shuttle Radar Topography Mission*), folha SA-23-Z-A com resolução espacial de 90 m, disponibilizada no formato TIFF pela EMBRAPA,

processada do *software* Arcgis 9.3, e baseando-se nos trabalhos de Silva & Rodrigues (2009).

As morfoestruturas mapeadas foram: Bacia de São Luís, Bacia de Barreirinhas, Bacia do Grajaú, Suíte Granitóide de Rosário, Arco Ferrer Rosário Bacana, Arco Ferrer Urbano Santos e Gráben de Ilha Nova (VEIGA JÚNIOR, 2000, SOARES JUNIOR *et al.*, 2008). As morfoesculturas identificadas constaram de: depósito quaternário eólico, planície flúvio-marinha, planície fluvial, colina dissecada, e superfície tabular (FEITOSA 1989, 1996, 2006).

#### 6.7 Estação experimental com técnicas de bioengenharia

As estações experimentais vêm se destacando nas últimas décadas no estudo sobre o entendimento do início e desenvolvimento de processos erosivos. Com o grande conhecimento adquirido dentro do campo da Geomorfologia Experimental, as estações vêm sendo aplicadas em diversas pesquisas, como por exemplo, no controle e recuperação de processos erosivos através de parcelas com diferentes técnicas (SUTHERLAND, 1998a, 1998b; GUERRA, 1990, 1996, 1999, 2003; BACCARO *et al.*, 1999; POESEN *et al.*, 1999; MORGAN, 2001; FULLEN & GUERRA, 2002; KIRKBY *et al.*, 2003; LEKHA, 2003; BEZERRA, 2006; MENDONÇA, 2006; SMETS *et al.*, 2008, 2009; SMETS & POESEN, 2009; BHATTACHARYYA *et al.*, 2009; BHATTACHARYYA *et al.*, 2010; BHATTACHARYYA, 2010).

Neste estudo, foi utilizada uma estação experimental na Universidade Federal do Maranhão, dentro da bacia do rio da Bacanga, com declividade de 20°. A referida

estação experimental foi utilizada por Mendonça (2006), com os seguintes procedimentos metodológicos:

As telas (geotêxteis) foram implantadas na estação experimental, ocupando-se quatro parcelas. Na parcela I foram aplicados os geotêxteis de buriti (*Mauritia flexuosa*). na parcela II, tucumã (*Astrocaryum vulgare Mart*) e canaúba (*Copernicia prunifera Mill*); na III, as meaçabas de babaçu (*Orbignya phalerata Mart*) e na parcela IV, o solo ficou exposto. Nas três primeiras parcelas foram adicionados nutrientes (NPK), uma camada de 2 cm de sedimentos (barro), sementes de três espécies de leguminosas: feijão guandu (*Cajanus cajan*), leucena (*Leucaena spp*), mucuna preta (*Stylobium aterrma*), duas espécies de gramíneas: *Brachiaria humidicula*, pojuca (*Paspalum atratum*); duas espécies de ervas medicinais: erva cideira (*Lippia alba*) e erva doce (*Pimpinella anisum*) e uma camada de 3 cm de terra preta. Em seguida foram fixados os geotêxteis, presos por grampos de ferro (MENDONÇA, 2006).

A estação experimental foi composta por duas parcelas com 10 m<sup>2</sup> cada, uma com solo exposto e outra com geotêxteis de buriti, sendo uma réplica para cada tratamento. Não foram adotadas medidas corretivas no solo. Na parte inferior das parcelas foram colocados quatro galões d'água com 200 litros de capacidade para avaliação dos parâmetros de perda de solo, através dos processos e subprocessos relacionados ao comportamento hídrico da água (Figuras 10, 11, 12, 13).

O monitoramento foi realizado no período chuvoso da região, abrangendo os meses de fevereiro a junho de 2009, com exceção do potencial matricial que foi monitorado até o início de agosto. Foram utilizados 1 kg de capim-braquiarião (*Brachiaria brizantha*). Após a execução dessas atividades, os geotêxteis foram fixados nas parcelas com grampos de ferro de 10 cm de comprimento (Figura 14).



Figura 10 – Construção da estação experimental. Foto: Mendonça, 2006.



Figura 11 - Adição de camada de dois cm de sedimentos (barro) e camada de 3 cm de terra preta. Foto: Mendonça, 2006.

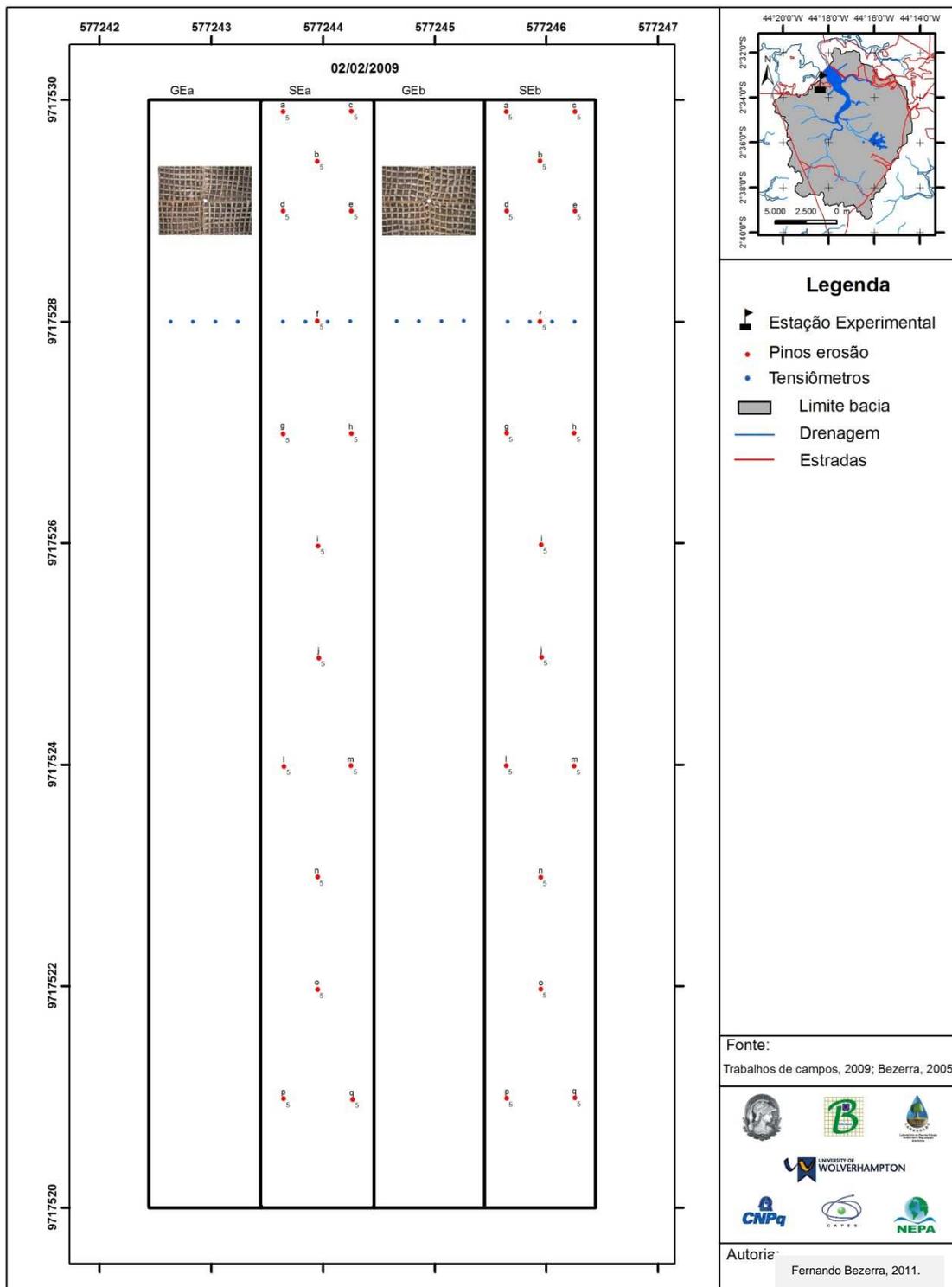


Figura 12 – Estação experimental com parâmetros avaliados.

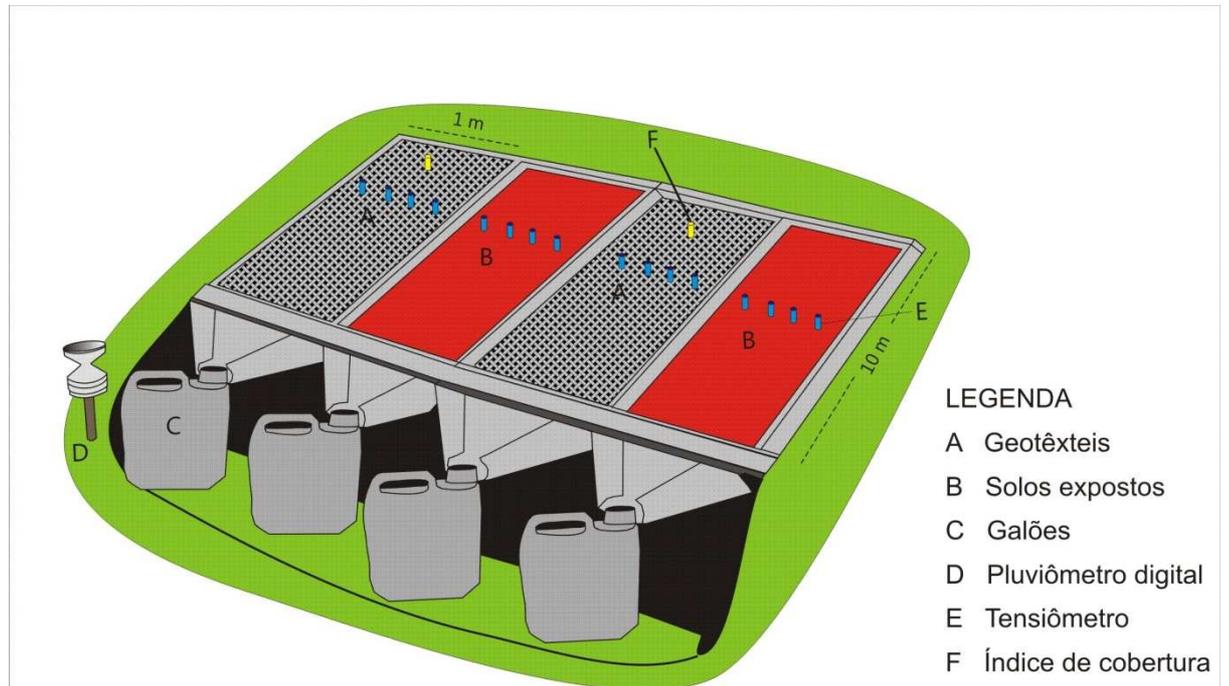


Figura 13 – Esquema da estação experimental. Autoria: Bezerra, 2011.



Figura 14 – Estação experimental. Foto: Bezerra, 2009.

### 6.7.1 Índice de cobertura vegetal

O índice de cobertura vegetal no experimento baseou-se nos trabalhos de Bezerra (2006) e Azevedo *et al.* (2005), e foi executado através da classificação supervisionada, a partir das ferramentas oferecidas pelo *software* Arcgis 9.3, na qual foi possível acompanhar o crescimento das gramíneas na parcela com geotêxteis, através da identificação dos pixels referentes aos geotêxteis, vegetação e solo exposto (Figuras 12, 13). A taxa de crescimento da cobertura vegetal foi acompanhada semanalmente a partir de fotografias horizontais do mesmo ponto a partir de um marco (Figura 15) no centro de uma área de 1 m<sup>2</sup> nas duas parcelas com geotêxteis, com auxílio de uma máquina digital 4.0, marca OLYMPUS.

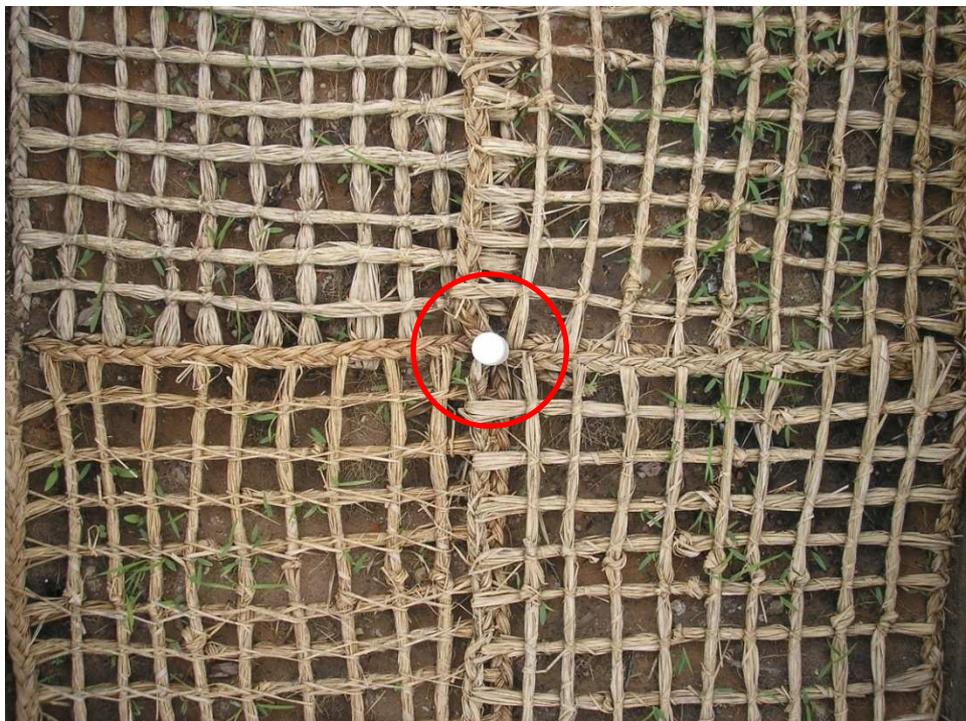


Figura 15 – Área de 1 m<sup>2</sup> com um marco no centro para o acompanhamento do índice de cobertura vegetal. Foto: Bezerra, 2009.

### 6.7.2 Pinos de erosão

Os 32 pinos de erosão foram instalados nas parcelas com solo exposto, sendo 16 pinos em cada parcela e suas respectivas leituras foram realizadas mensalmente com auxílio de uma régua graduada, baseado nos estudos de Morgan (2001) e Guerra (2005). Os pinos utilizados são pregos de 20 cm, sendo enterrados no solo até a profundidade de 15 cm (Figura 16). Com esses dados foi possível acompanhar as áreas de erosão e deposição ao longo das duas parcelas e relacioná-las com as taxas de escoamento superficial, perda de sedimentos e índices pluviométricos.



Figura 16 – Pinos de erosão (Pregos) com 20 cm de comprimento.

Foto: Bezerra, 2009.

### 6.7.3 Potencial matricial

Na estação experimental, foram instaladas quatro baterias de tensiômetros nas parcelas com solo exposto e com geotêxteis em diferentes profundidades (10, 20, 30 e 60 cm) com auxílio de um trado adaptado (Figura 17), e suas respectivas leituras foram realizadas diretamente no vacuômetro de Bourdon, sendo convertido de mm Hg para kPa ( $760 \text{ mm Hg} = 101,3 \text{ kPa}$ ). Os tensiômetros foram instalados no sentido transversal da parcela, sendo suas leituras realizadas duas vezes por semana e seus respectivos dados anotados em uma ficha de campo.



Figura 17 - Trado adaptado para instalação dos tensiômetros.

Foto: Bezerra, 2009.

Periodicamente houve a necessidade de colocar água nos tensiômetros com auxílio do funil (Figura 18), devido às características dos aparelhos, que possuem capsulas porosas nas suas extremidades, que entram em “equilíbrio” com os fluídos no solo. Os dados dos tensiômetros foram convertidos de mm Hg para kPa nas respectivas profundidades com a utilização da formula abaixo, de acordo com os estudos de Azevedo & Silva (1999):

$$\Phi_m = L - 0,0736.h$$

$\Phi_m$  = Tensão da água no solo (kPa)

L – Leitura do vacuômetro (mmHg)

h – Altura da coluna de água no interior do tensiômetro (mm)



Figura 18 – Preenchimento de água nos tensiômetros.

Foto: Bezerra, 2009.

#### 6.7.4 Escoamento superficial e transporte de sedimentos

O escoamento superficial foi determinado duas vezes por semana na estação experimental. Os dados de escoamento foram obtidos com sucessivas medições da capacidade dos galões de 100 litros e 200 litros (Figura 19), com o auxílio de uma balde de 10 litros e um becker de 1 litro. O volume do escoamento foi convertido de L para  $L\ m^{-2}$ . Foi coletado 1 litro a partir da homogeneização da solução, com auxílio de um bastão de 1,5 m. Este procedimento teve o objetivo de coletar amostras dos sedimentos transportados pelo escoamento para a pesagem no laboratório. A taxa de produção de sedimento foi convertida de g para  $g\ m^{-2}$ . Os sedimentos retidos nas calhas também foram pesados (Figura 20). Os dados de pluviosidade foram obtidos a partir de pluviômetro com *datalog*, instalado no experimento.

A partir dos dados de volume de cada parcela no experimento e baseado nos estudos de Sutherland (1998a, 1998b) foram calculados o coeficiente de escoamento superficial (CES), eficiência dos geotêxteis na redução do escoamento superficial (RES), a eficiência dos geotêxteis na redução da produção de sedimentos (RPS):

$$CES = 100x \frac{\text{Volume do escoamento superficial (mm)}}{\text{Volume de precipitação (mm)}}$$

$$RES = 100x \frac{[\text{CES solo exposto (\%)} - \text{CES geotêxteis e vegetação (\%)}]}{\text{CES solo exposto (\%)}}$$

$$RPS = 100x \frac{[\text{Produção de sedimentos solo exposto (g)} - \text{Produção de sedimentos geotêxteis e vegetação (g)}]}{\text{Produção de sedimentos solo exposto (g)}}$$



Figura 19 – Diferentes galões para o monitoramento do escoamento superficial e perda de sedimentos. Foto: Bezerra, 2009.



Figura 20 – Calhas coletoras de sedimentos na estação experimental. Foto: Bezerra, 2009.

## 6.8 Reabilitação de áreas degradadas com técnicas de bioengenharia de solos

O processo de reabilitação da área degradada foi realizado entre os dias 23 a 28 de fevereiro de 2008, seguindo as etapas (Tabela 6): 1. Aquisição dos equipamentos e materiais necessários, como tratores, pás e enxadas, adubo de palmeira, semente de braquiária, estacas de madeira e ferro; 2. Contratação de 10 trabalhadores da comunidade para a aplicação da técnica; 3. Retaludamento das áreas com alta declividade (determinadas com a bússola de geólogo, tipo Brunton), com auxílio de uma retroescavadeira e manualmente com os trabalhadores; 4. Aplicação de uma camada de 3 cm de adubo de palmeira, com semeadura manual de braquiária; 5. Fixação dos geotêxteis com estacas de madeira e ferro; e 6. Manutenção das obras de contenção, com registros fotográficos (Figuras 21, 22, 23, 24).

Tabela 6 – Despesas do projeto de recuperação da voçoroca do Sacavém.

<b>ESPECIFICAÇÕES</b>	<b>VALOR</b>
Fabricação de 3000 telas	R\$ 6.000,00
Barra de ferro	R\$ 143,00
Ripa	R\$ 63,00
Produção de estacas (800)	R\$ 245,00
Serviço de serralheiro	R\$ 50,00
Mat de const	R\$ 107,00
56 diárias de pedreiro	R\$ 1.100,00
500 peças de escoras	R\$ 1.650,00
10kg de arames	R\$ 70,00
400 sacos de adubo de palmeira	R\$ 2.800,00
Criação de estacas	R\$ 40,00
6- sc de calcáreo dolomítico- 2-sc de capim braquiara 32% - 3sc de adubo for. 10.10.10 50kg	R\$ 477,00
1 carrada pedra bruta	R\$ 240,00
94 mudas de sabiá	R\$ 150,00
16 hs de retroescavadeira	R\$ 1.600,00
5 hs de pá mecânica	R\$ 600,00
4 Costureiras de telas (3 dias)	R\$ 185,00
Combustível	R\$ 259,50
<b>TOTAL</b>	<b>R\$ 15.779,50</b>



Figura 21 – Retaludamento da área com retroescavadeira. Foto: Bezerra, 2008.



Figura 22 – Retaludamento com trabalho manual. Foto: Bezerra, 2008.



Figura 23 – Aplicação dos geotêxteis e insumos. Foto: Bezerra, 2008.



Figura 24 – Manutenção dos trabalhos de reabilitação. Foto: Bezerra, 2008.

## 6.9 Análises de laboratório

Para determinação do peso dos sedimentos transportados nas parcelas com solo exposto e solo com geotêxteis, foi utilizado o método da filtragem (Figura 25), sendo coletado 1 litro de amostras a partir da homogeneização da solução (água + sedimentos) nos galões. Posteriormente foi determinado o peso das partículas sólidas retidas no filtro, com auxílio de uma balança de precisão. Os sedimentos depositados nas calhas das parcelas também foram pesados e somados com os sedimentos dos galões. A taxa de produção de sedimento foi convertida de g para  $\text{g m}^{-2}$ .



Figura 25 – Filtragem das amostras de água.

Foto: Bezerra, 2009.

As análises de espectrometria de fluorescência de raios-X e granulometria a laser foram executadas na *School of Applied Science* da Universidade de Wolverhampton, Inglaterra. Para estas atividades, foram coletadas 76 amostras ao longo da bacia do rio Bacanga, sendo 40 oriundas da estação experimental (10 em cada parcela) localizada na Universidade Federal do Maranhão e 36 amostras coletadas (4 em cada voçoroca) ao longo da área da bacia em estudo. Para o processo de exportação das amostras do Brasil para a Inglaterra foi necessário o peneiramento (600 mm/ $\mu$ m) destas, bem como a queima de matéria orgânica com forno mufla (Figura 26), com o intuito de atender as exigências fitossanitárias.



Figura 26 – Queima da matéria orgânica nas amostras no forno mufla.

Foto: Bezerra, 2009.

A espectrometria por fluorescência de raios X foi imprescindível para o conhecimento da composição dos elementos químicos das amostras de solos da bacia do rio Bacanga. É uma técnica de análise qualitativa e quantitativa, segunda a qual, cada elemento químico emite espectros com características diferenciadas quando excitados por raios X, sendo o equipamento utilizado o *Spectro Xepos* (Figura 27).

Para a análise foram realizados os seguintes procedimentos metodológicos:

1. Destorroamento das 76 amostras de solos no almofariz de porcelana, com auxílio do pistilo;
2. Peneiramento das 76 amostras na malha de 150  $\mu\text{m}$ ;
3. Pesagem de 8,5 g de sedimentos de cada amostra, posteriormente foi feita a mistura de 1,5 g de cera no recipiente de plástico;
4. Compactação das amostras, utilizando a prensa hidráulica (Figura 28), resultando numa pastilha de três cm de diâmetro (Figura 29).



Figura 27 – Equipamento utilizado nas análises de espectrometria de fluorescência de raios X. Foto: Bezerra, 2009.



Figura 28 – Prensa hidráulica utilizada. Foto: Bezerra, 2009.

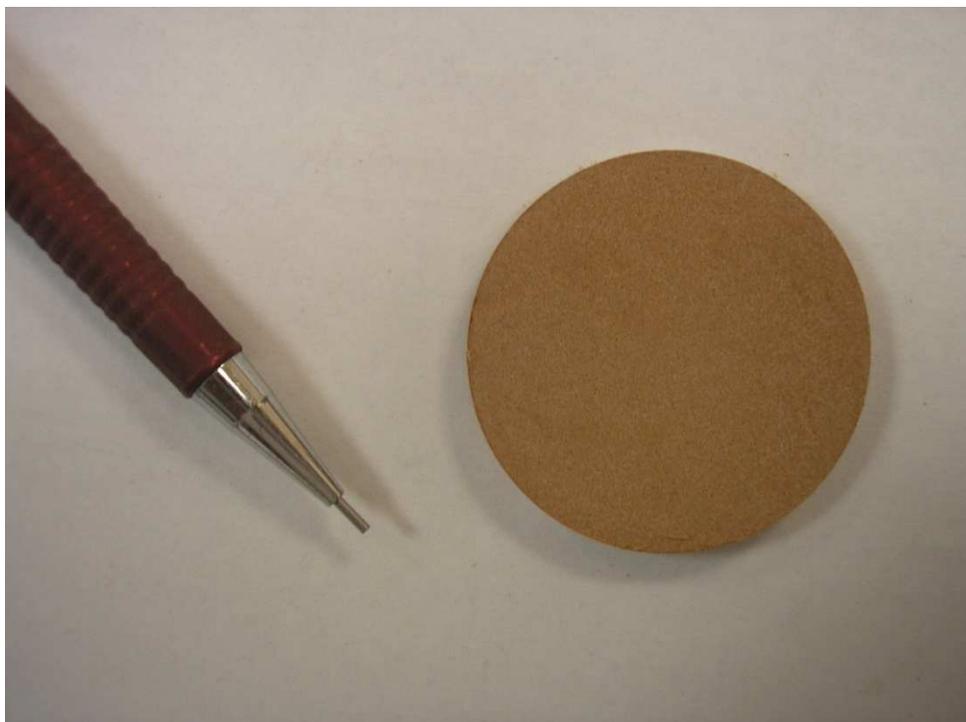


Figura 29 - Compactação das amostras, resultando numa pastilha de 3 cm de diâmetro. Foto: Bezerra, 2009.

A granulometria por difração a laser, que consiste no espalhamento de luz laser, baseia-se no fato de que o ângulo de difração é inversamente proporcional ao tamanho da partícula. Para esse procedimento, não foi necessário o peneiramento das 76 amostras de solos e subsequente separação entre os diâmetros mais grosseiros e finos, tendo em vista o prévio procedimento em São Luís (600 mm). O limite de análise do diâmetro do grão no aparelho é menor que 1000  $\mu\text{m}$ . Para a preparação das amostras foram utilizados 10 g destas, cinco ml de peróxido de hidrogênio para ignição da matéria orgânica, com 20 minutos na placa quente até a solução ficar pastosa. Após esse etapa, foi aplicada cinco gotas de calgon ( $\text{Na}_{(n+2)}\text{PnO}_{(3n+1)}$ ). O equipamento utilizado depois desse processo foi o Mastersizer 2000 (Figura 30). A conversão de % para  $\text{g kg}^{-1}$  foi afeita através da multiplicação por 10.



Figura 30 – Equipamento utilizado para a granulometria a laser. Foto: Bezerra, 2009.

## 6.10 Análises estatísticas

As análises estatísticas que foram utilizadas objetivaram selecionar e ordenar os dados levantados no decorrer das atividades de campo e laboratório para torná-las manipuláveis e compreensíveis. Os dados da pesquisa foram tabulados e organizados no software Excel 2003 e analisados estatisticamente com o auxílio do software estatístico *R Project*, versão 2.12.0 para o cálculo da estatística descritiva e inferencial.

Para a verificação sobre a distribuição normal dos dados, foi adotado o teste de normalidade de Anderson-Darling (amostras maiores que sete) e o teste de Shapiro-Wilk (amostras menores que sete). Como as variáveis, escoamento superficial, perda de sedimentos não seguem uma distribuição normal em nível de 5% de significância ( $p < 0,05$ ), foi necessária a transformação logarítmica, com o intuito de realizar as análises de regressão.

Os dados da pesquisa também foram submetidos aos testes de comparação das médias (*t-student*), ANOVA (Análise de variância), Mann-Whitney, Kruskal-Wallis, e Dunn (Nemenyi-Damico-Wolfe-Dunn), dependendo dos resultados do teste de normalidade.

## 7. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 7.1 Características geoambientais da área

#### 7.1.1 Uso e ocupação do solo

O município de São Luís, onde está inserida a bacia do rio Bacanga, possui uma área de 831,7 Km<sup>2</sup> localizando-se na parte centro-oeste da Ilha do Maranhão, com coordenadas 2° 19' 09" - 2° 51' 00" S e 44° 01' 16" - 44° 19' 37" W, tendo como limites: a leste - São José de Ribamar; ao norte - Oceano Atlântico; a oeste - Paço do Lumiar e ao sul - Rosário, com uma população em torno de 1.011.943 habitantes segundo dados do IBGE (2010).

Com relação ao processo de ocupação urbana de São Luís, tem-se percebido, que desde 1612 até os dias atuais, esse processo vem passando, a nível nacional, por uma significativa evolução, apresentando fases diferenciadas de crescimento urbano, influenciada por fatos relevantes da história da cidade.

Como fase importante do crescimento urbano, cabe ressaltar o surto industrial que se deu em São Luís, a partir da segunda metade do século XVIII, época em que a maioria das fábricas existente no Maranhão localizava-se na cidade. Outro período de grande crescimento populacional ocorreu nas décadas de 50 e 60 do século XX, devido à migração de famílias vindas do Sertão Nordestino, expulsas da grande seca de 50 (DINIZ, 1993). Entre as décadas de 70 a 90 o contingente populacional de São Luís tem aumentado extraordinariamente em face dos projetos industriais como a ALUMAR (Alumínios Maranhão) e Companhia Vale do Rio Doce (CVRD), atual VALE.

Para Diniz (1993), o crescimento demográfico de São Luís, foi um dos fatores, que atrelados aos movimentos migratórios, mais contribuiu para a expansão urbana da cidade.

No sistema urbano maranhense, a cidade de São Luís, capital do Estado, situa-se no ápice da hierarquia por possuir maior número e diversidade de funções e por sua população urbana ser superior às demais. Convém ressaltar que, embora São Luís tenha limites político-administrativos com os municípios de São José de Ribamar, Paço do Lumiar e Raposa, em termos econômicos esses são totalmente dependentes da capital. Portanto, uma análise da aglomeração urbana de São Luís requer uma abordagem extensiva a toda à ilha, já que as áreas ainda não totalmente integradas no espaço construído já se constituem em reservas de expansão, tanto do crescimento habitacional como aquele destinado a fins industriais, e demais atividades a serem induzidas (FERREIRA, 1989).

No município de São Luís, podem-se determinar as seguintes categorias de uso e ocupação do solo: área urbanizada, área tombada, restrita à ocupação, institucional, jurisdicional, ocupação desordenada, espaço não construído, aproveitamento econômico, lazer, turismo, expansão, diversos e águas (MARANHÃO, 1998). Na área da bacia do rio Bacanga, foram identificados diversos usos, destacando-se: área urbanizada, espaço não-construído, restrita à ocupação e aproveitamento econômico e expansão (Figura 31). A cobertura vegetal desempenha uma importante função na paisagem e nos estudos de uso da terra.

A formação e desenvolvimento da vegetação refletem as condições ambientais, tais como sazonalidade climática, associada às condições do solo e do relevo. Para Feitosa (1989), ao longo do território maranhense, este

condicionamento se manifesta seguindo uma variação meridional em face da distribuição dos índices climáticos.

Segundo Fonseca (2001), as formações vegetais primitivas da Ilha do Maranhão foram quase totalmente substituídas, restando tipos de vegetação secundária mista, caracterizadas pela ocorrência de plantas herbáceas e palmáceas, nas zonas emersas, e manguezais na faixa litorânea.

A floresta secundária mista, oriunda da devastação da floresta, localiza-se nas áreas mais elevadas e vêm sofrendo acelerado processo de devastação. Tem o predomínio da capoeira, que surge em decorrência da derrubada originada principalmente, do acelerado processo de ocupação do espaço urbano, estando bastante reduzida devido à expansão urbana de São Luís (Figura 32). Na área de estudo destaca-se o Parque Estadual do Bacanga, que abrange grande parte da floresta secundária na bacia do rio Bacanga (Figura 33). Na porção de maior influência antrópica, evidencia-se a presença de vegetação arbustiva com 2 a 4 m de altura.

Na área periodicamente alagada pelos afluentes dos que drenam o município, observam-se espécies como: *Euterpe oleracea* (juçara), *Carapa guianensis* (andiroba), *Mauritia flexuosa* (buriti). Enquanto na mata de terra firme, encontram-se espécies como: *Parkia pendula* (faveiro), *Hymenaea courbaril* (jatobá) e *Plantonina insignis* (bacuri) (FONSECA, 2001).

Destacam-se ainda os manguezais, mata de galerias, restingas, floresta e campos inundáveis. Os mangues estão nos trechos sujeitos à influência das marés, bem como no interior de baías, lagunas, braços de mar e baixos cursos de rios, até onde a salinidade se faz presente.

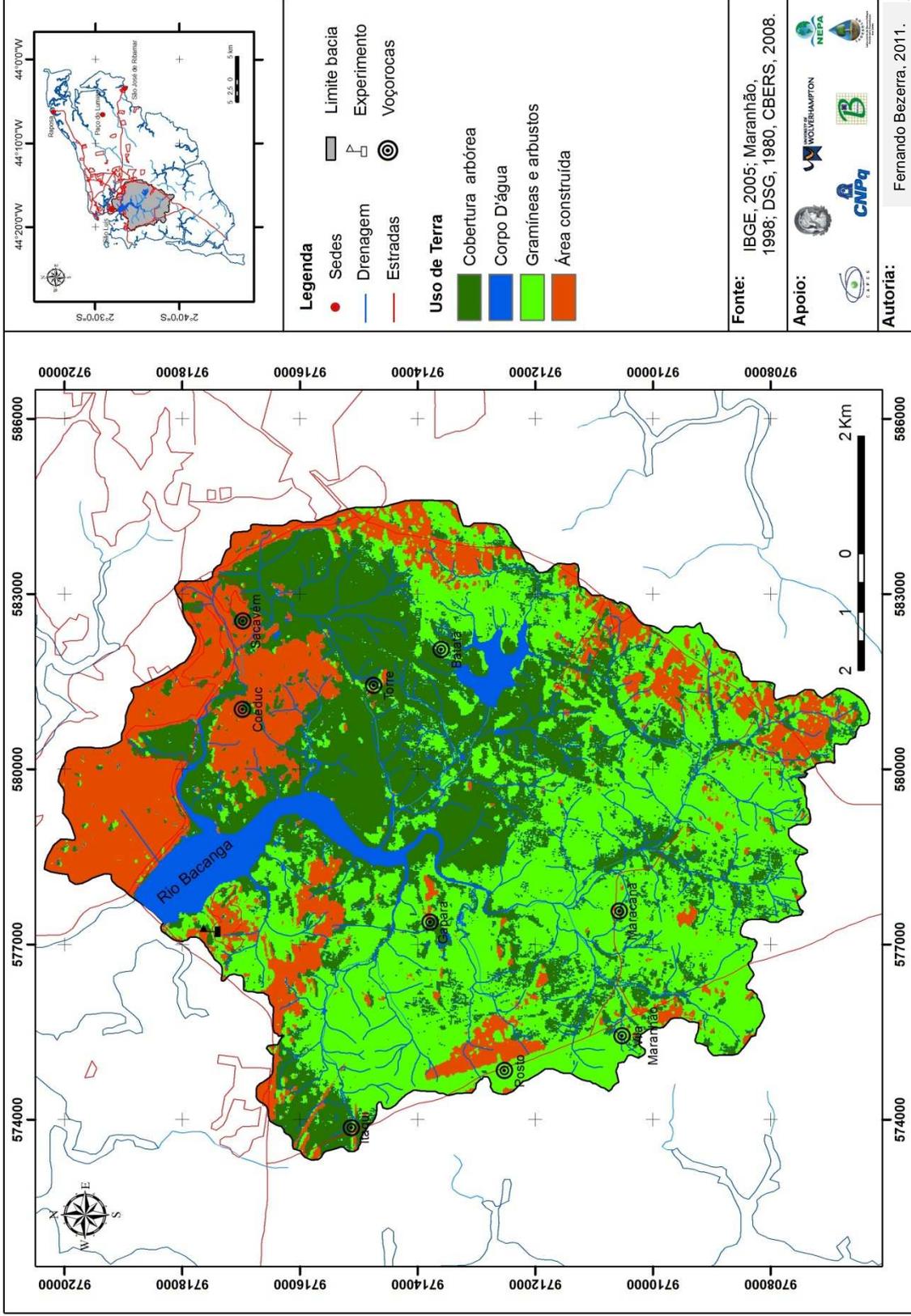


Figura 31 – Mapa de uso e ocupação do solo na área da bacia do rio Bacanga. Foto: Bezerra, 2009.



Figura 32 - Ocupação na área da bacia do rio Bacanga, nas proximidades da voçoroca do Sacavém. Foto: Bezerra, 2009.



Figura 33 – Vegetação secundária mista no Parque estadual do Bacanga (Voçoroca do Batatã. Foto: Bezerra, 2009.

### 7.1.2 Geologia

Na área-objeto de estudo, assim como em toda a Ilha do Maranhão, as estruturas geológicas superficiais são constituídas por rochas da Formação Itapecuru (Figura 34), originárias do Cretáceo, sobrepostas, em algumas áreas, por camadas da Formação Barreiras (Figura 35) que datam do Terciário, e por sedimentos quaternários da Formação Açuí (Figura 36). As rochas de idade Terciária estão dispostas, principalmente nos tabuleiros e nas vertentes, enquanto os sedimentos quaternários estão na zona litorânea e nas desembocaduras dos rios (FEITOSA, 1989, 1996, 2006).

De acordo com Maranhão (1998), a Formação Barreiras é a Unidade Litoestratigráfica de maior distribuição superficial, predominando em toda área, constituindo-se essencialmente de arenitos.

A litologia da área é essencialmente sedimentar e em geral estratificada, inconsolidada, bastante porosa, permeável e de baixa resistência à erosão, sendo a superfície representada por arenitos muito friáveis. Essas características associadas a outros fatores geoambientais, tais como o clima e a hidrografia, que atuam com muita intensidade, conferem grande vulnerabilidade da área aos processos erosivos (MARANHÃO, 1998).

Com isso, torna-se evidente a contribuição de agentes morfogenéticos de origem climática, oceanográfica e antrópica no trabalho de redução da amplitude altimétrica das unidades topomorfológicas do município e da bacia do rio Bacanga, destacando-se o trabalho da drenagem e o do homem.



Figura 34 – Voçoroca do Coeduc na Formação Itapecuru. Foto: Bezerra, 2009.



Figura 35 – Voçoroca do Itaqui na Formação Barreiras. Foto: Bezerra, 2009.

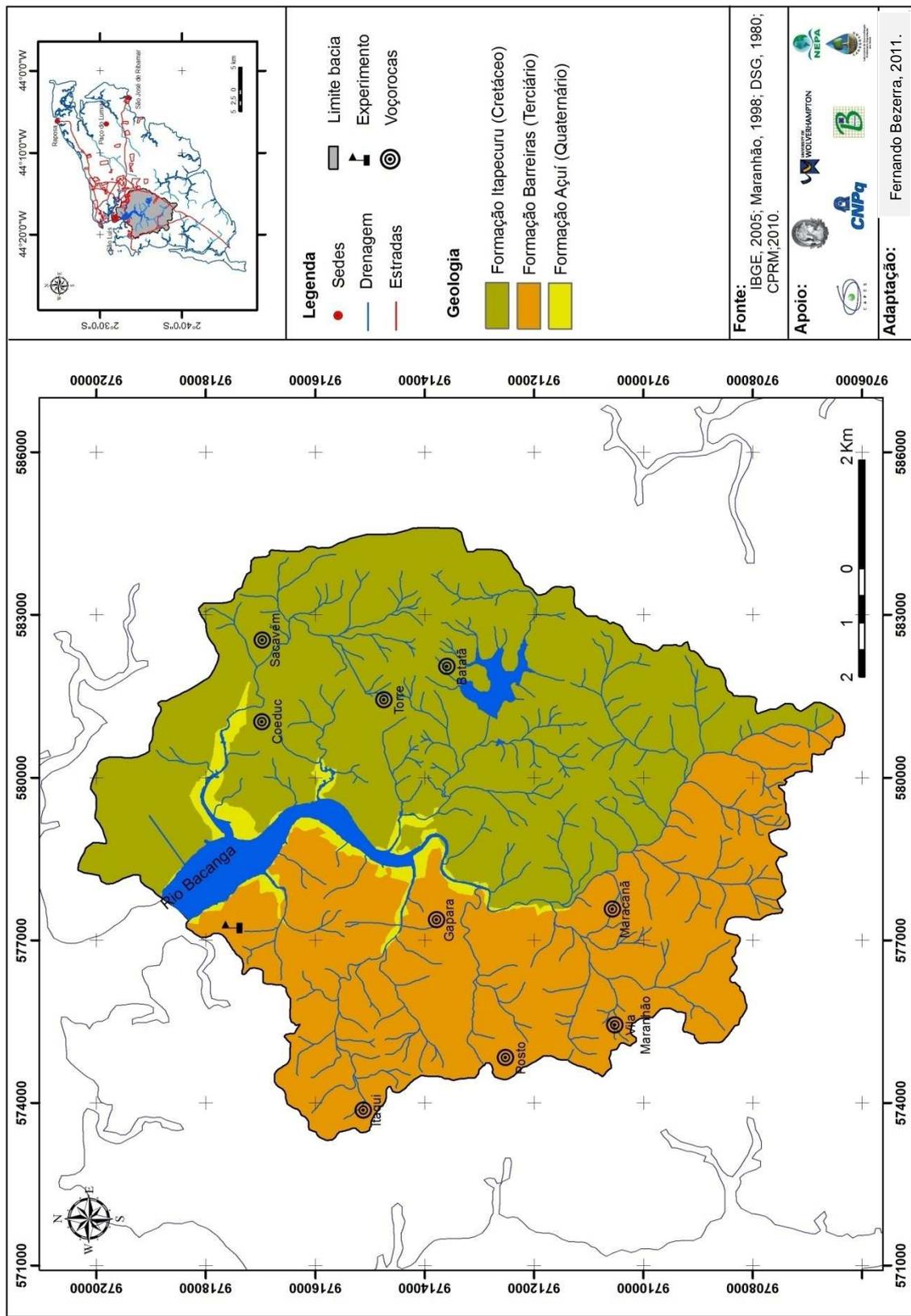


Figura 36 - Mapa de geologia da bacia do rio Bacanga.

### 7.1.3 Solos

Quanto aos aspectos pedológicos encontram-se na área os seguintes solos adaptados para a atual classificação da EMBRAPA (1999): Argissolos vermelho-amarelo com lateritas (Figura 37), Argissolos vermelho-amarelo, Neossolos regolíticos (Figura 38), Gleissolos e Neossolos quartzarênicos (MARANHÃO, 1998).

De acordo com Pereira (2006), os solos nos tabuleiros da bacia do rio Bacanga, apresentam as seguintes características:

O solo encontrado nos tabuleiros da Bacia do Rio Bacanga é o ferralítico (Sistema Francês) equivalente aos argissolos do Sistema Brasileiro, antigamente denominado podzóico vermelho-amarelo concrecionário. Caracteriza-se por apresentar coloração avermelhada, intensa presença de laterita em matriz areno-argilosa a argilo-arenosa, cuja fração argila é representada pela caulinita (PEREIRA, 2006).

Na área da bacia do Bacanga há a ocorrência também de Neossolos Regolíticos e Neossolos Quartzarênicos que ocorrem nas áreas de mangues, junto às margens do canal principal e alguns afluentes. Os Neossolos Regolíticos formam solos poucos desenvolvidos, profundos, ácidos, permeáveis, muito bem drenados e com fertilidade natural muito baixa (Figura 38). Os Neossolos Quartzarênicos (solos halomórficos) apresentam alta salinidade que varia de acordo os períodos seco e chuvoso (FEITOSA, 1996).

Considerando as condições apresentadas pela litologia, os solos da área de estudo são, em geral, muito suscetíveis aos processos erosivos. Estas características, nas áreas de maior declive e condições favoráveis à ocorrência desses processos, notadamente, quando submetidas à intervenção antrópica, desvinculada de planejamento, que considere os riscos impostos ao equilíbrio da paisagem (Figura 39).



Figura 37 - Argissolo vermelho-amarelo com lateritas (voçoroca da Vila Maranhão).

Foto: Bezerra, 2009.



Figura 38 – Neossolos Regolíticos (voçoroca do Sacavém). Foto: Bezerra, 2009.

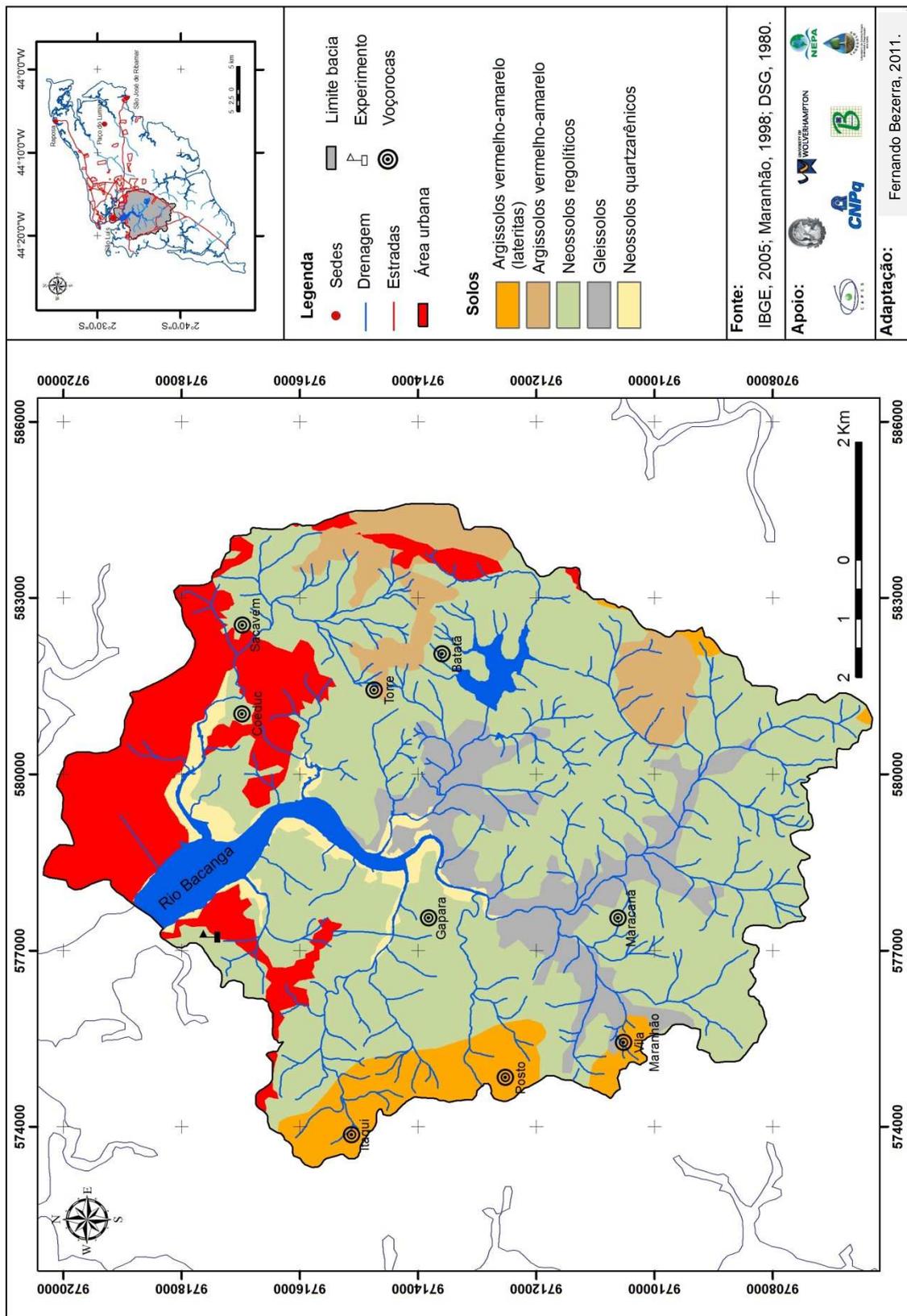


Figura 39 - Mapa de solos da bacia do rio Bacanga.

#### 7.1.4 Geomorfologia

Apesar das primeiras descrições da morfologia regional terem sido feitas pelos frades capuchinhos em missão religiosa, os quais integravam a expedição francesa liderada por Daniel de La Touche, que ocupou a Ilha do Maranhão em 1612 e fundou o Forte de São Luís (FEITOSA, 1989), a primeira abordagem com caráter técnico sobre o relevo maranhense foi feita por Ab'saber na década de 1960, que o classificou em quatro unidades: os Chapadões das Regiões Centrais e Meridionais; uma área de transição com Relevos Residuais; as Colinas Terciárias e o Golfão Maranhense (FEITOSA, 1989, 1996).

Sobre a geomorfologia da Ilha do Maranhão, durante sua evolução geomorfológica, ocorreram diferentes fases de desenvolvimento, sendo que as transformações mais significativas resultaram numa paisagem pontuada de formas residuais, que encerram caracteres de antigos ambientes (FEITOSA, 1989). Predominam formas tabulares e subtabulares (Figuras 40, 41), intercaladas por colinas dissecadas sob uma litologia sedimentar.

A geomorfologia na área de estudo caracteriza-se por formas com pequena amplitude altimétrica, devido à ação de diversos agentes morfogenéticos que atuam com grande intensidade, uma vez que as características físicas são favoráveis às constantes modificações na paisagem (Figura 42). Entre os agentes morfogenéticos, destacam-se os climáticos, os oceanográficos e as ações antrópicas, que desenvolvem processos geomórficos de natureza escultural, sobre uma litologia predominantemente sedimentar estratificada e geralmente pouco consolidada (MARANHÃO, 1998).



Figura 40 - Forma tabular com processos erosivos nas bordas, proximidades da voçoroca do Gapara. Foto: Bezerra, 2009.



Figura 41 – Superfícies tabulares e subtabulares com processos erosivos nas bordas, proximidades da voçoroca Torre. Foto: Bezerra, 2009.

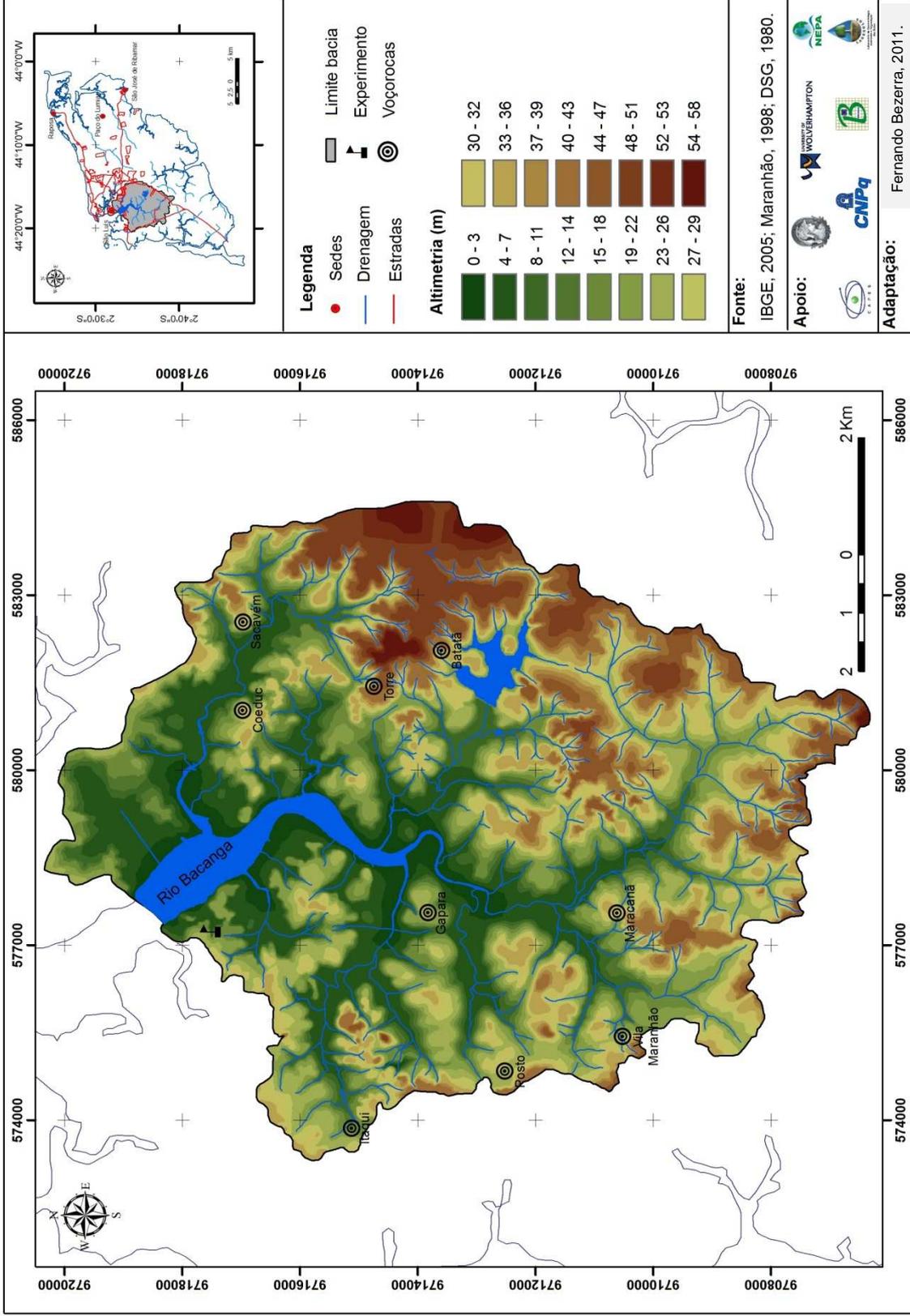


Figura 42 - Mapa de hipsometria da bacia do rio Bacanga.

### 6.1.5 Hidrografia

Na área-objeto do estudo ocorre intensa ação hidrológica na elaboração do relevo (Figura 43). Evidencia-se a atividade dos rios no modelado das áreas emersas, através da produção e da distribuição dos sedimentos ao longo dos cursos fluviais. Por outro lado, a hidrodinâmica marinha contribui com a produção de detritos, pelo solapamento de barreiras e cordões arenosos, e sua distribuição ao longo da costa, junto com os sedimentos de origem fluvial (MARANHÃO, 1998).

A Ilha do Maranhão é banhada por vários rios, dentre os quais se destacam: Bacanga, Anil, Tibiri, Paciência, Cachorros e Jeniparana, além de uma grande quantidade de rios de pequeno porte. Tais rios seguem diferentes direções.

De acordo com Feitosa (1989), os rios que correm para o norte do município de São Luís podem ser analisados segundo o ambiente costeiro onde deságuam. Nas zonas dominadas por praias e dunas, desembocam os pequenos rios, enquanto os maiores, Anil e Bacanga, drenam a zona caracterizada por depósitos de vasa, igarapés e baixadas flúvio-marinhas, preenchidas por manguezais.

As bacias hidrográficas da Ilha do Maranhão encontram-se em acelerado processo de degradação ambiental, destacando-se aquelas localizadas nas áreas fortemente urbanizadas, como as bacias do Anil e Bacanga (Figura 44) que drenam áreas do município de São Luís. As outras bacias, dentre as quais se inclui a do rio Paciência, apresentam menor densidade populacional o que incide direta e indiretamente na gravidade dos problemas ambientais. Na bacia do Bacanga, as áreas mais conservadas estão situadas nas proximidades do reservatório do Batatã (Figura 45), na área da reserva do Parque Estadual do Bacanga.

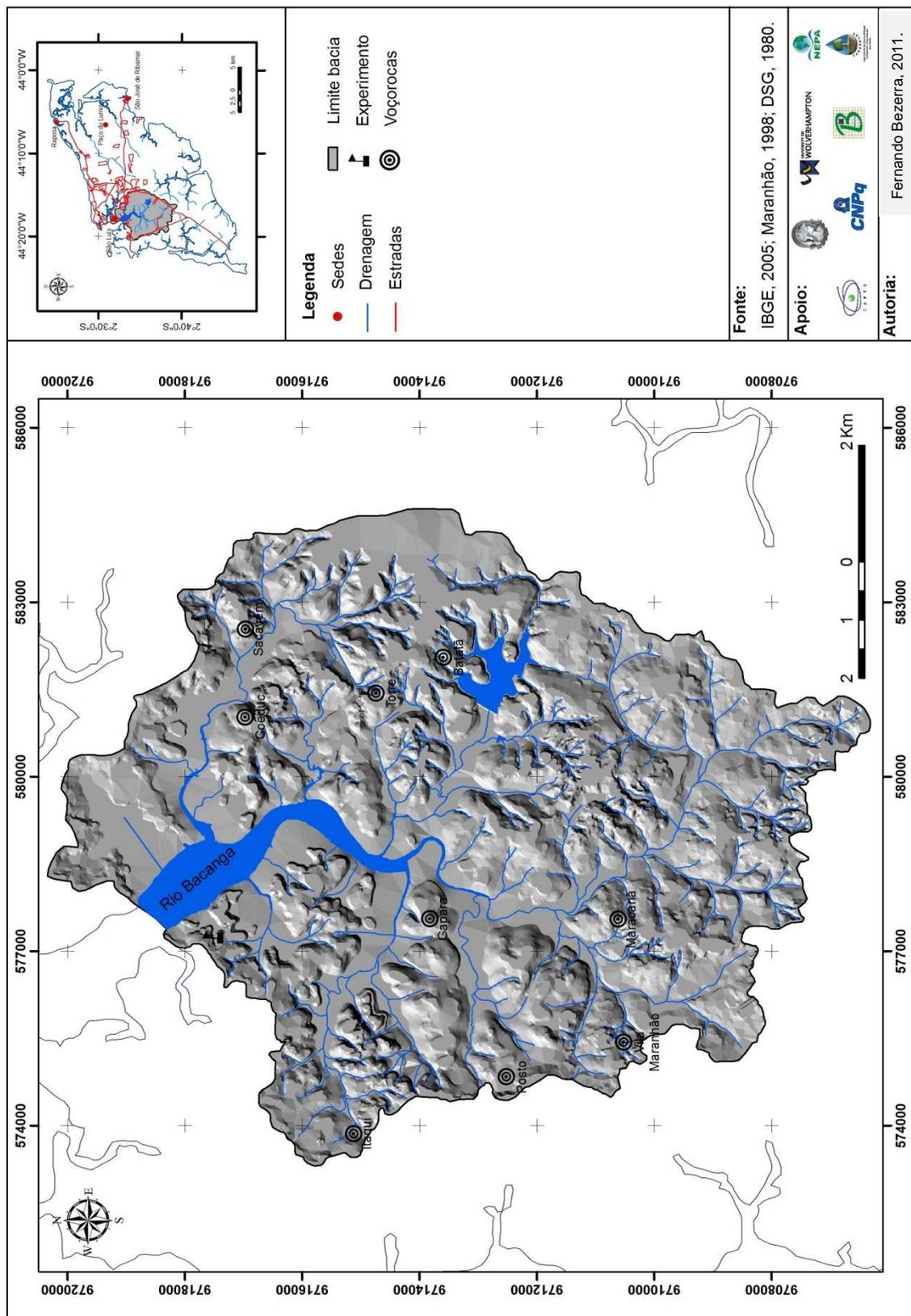


Figura 43 - Mapa de sombreamento do relevo com respectiva drenagem.

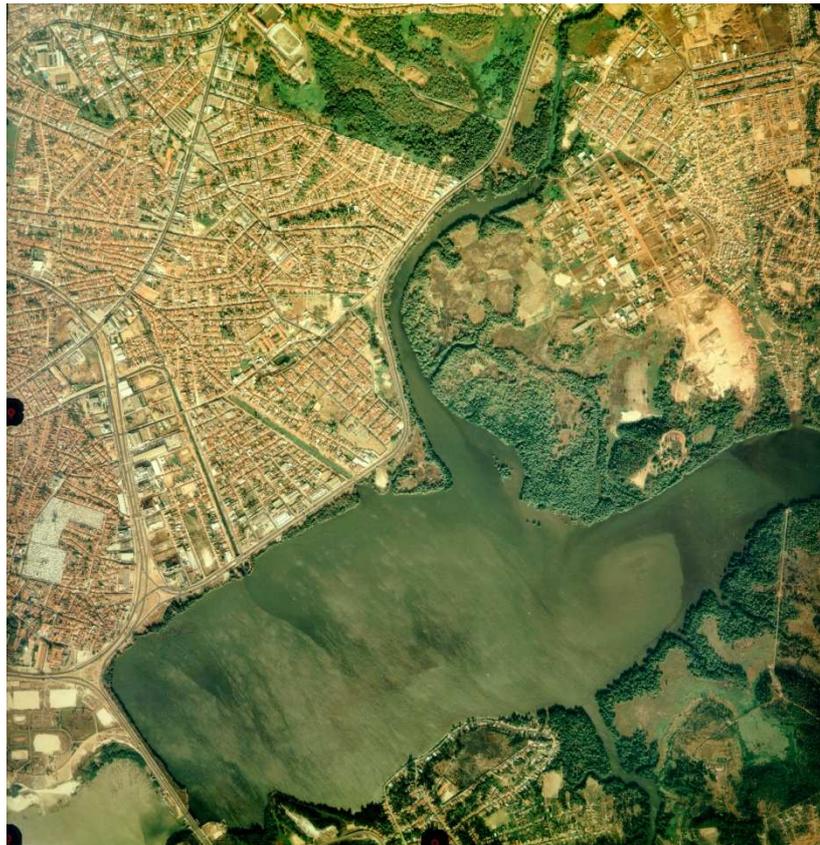


Figura 44 – Vista parcial da bacia do rio Bacanga.  
Fonte: INPE/EMBRAPA, 1999, escala 1:8.000.



Figura 45 – Reservatório da Batatã na bacia do rio Bacanga, proximidades da voçoroca do Batatã. Foto: Bezerra, 2009.

### 7.1.6 Clima

O município de São Luís, por se encontrar em uma região de baixa latitude apresenta elevadas temperaturas, devido à incidência de raios solares, o que implica na intensificação dos processos morfogenéticos. De acordo com a classificação de Köppen (1948), o clima da área de estudo corresponde ao tipo Aw, quente e úmido, com chuvas de verão e outono que apresenta dois períodos distintos: um chuvoso que se estende de janeiro a junho, com alto índice pluviométrico e outro seco, entre julho e dezembro (MARANHÃO, 1998) (Figuras 46, 47).

Segundo Fonseca (2001), o clima predominante da Ilha do Maranhão é o tropical úmido, com médias anuais de temperaturas em torno de 26°C, atingindo níveis superiores nos meses de outubro e dezembro e inferiores em abril e maio.

A precipitação ultrapassa os 2.000 mm/ano, tendo cerca de 80% do período chuvoso distribuído entre os meses de janeiro a junho, com maior concentração em março e abril e níveis mais baixos nos meses de setembro e outubro (FEITOSA, 1989) (Figuras 46, 47).

O sistema que mais interfere na dinâmica atmosférica da área é representado pelos ventos alísios de nordeste, originários do anticiclone dos Açores (LOPES, 1970). Já os ventos alísios de sudeste exercem pequena influência sobre o clima dessa região, apesar de sua ação determinante no clima do Nordeste Oriental.

Com base nos dados das séries históricas das estações das estações meteorológicas da SUDENE (Superintendência de Desenvolvimento do Nordeste), da rede pluviométrica do DNAE (Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica), e laboratório Meteorológico da Universidade Estadual do Maranhão, no período de 1971 a 1998, e 2003 a 2008, referentes às estações de São Luís, São

José de Ribamar e Bacabeira, foi produzido o mapa de distribuição pluviométrica da bacia do rio Bacanga, conforme a metodologia, com os seguintes intervalos: 2.097 – 2.127 mm; 2.128 - 2.149 mm; 2.150 – 2.179 mm (Figura 48).

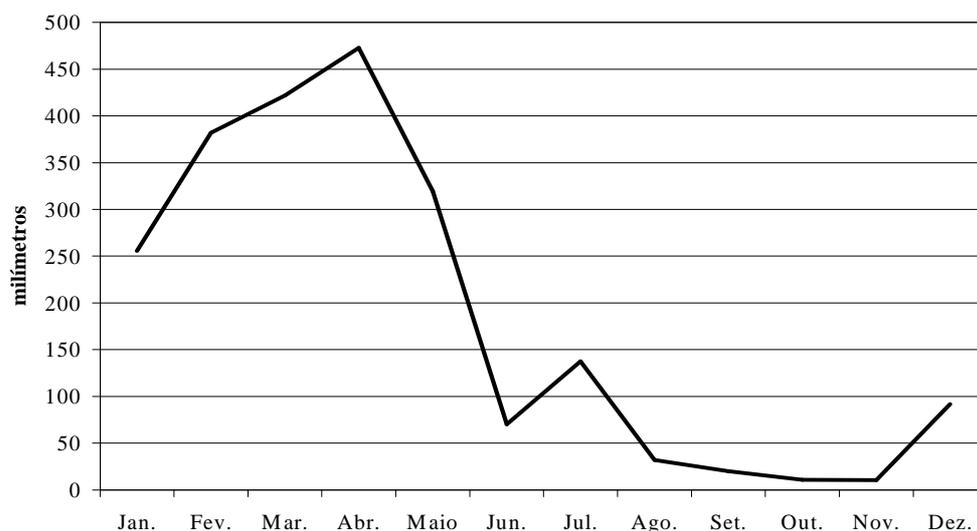


Figura 46 – Média mensal das chuvas em São Luís (1961-1998).

Fonte: Araújo *et al.*, 2002.

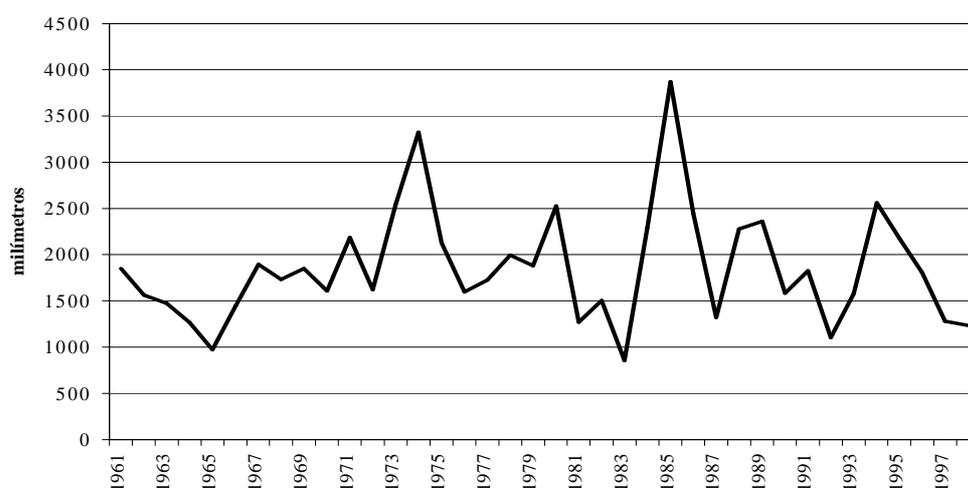


Figura 47 – Pluviosidade total anual em São Luís (1961-1998).

Fonte: Araújo *et al.*, 2002.

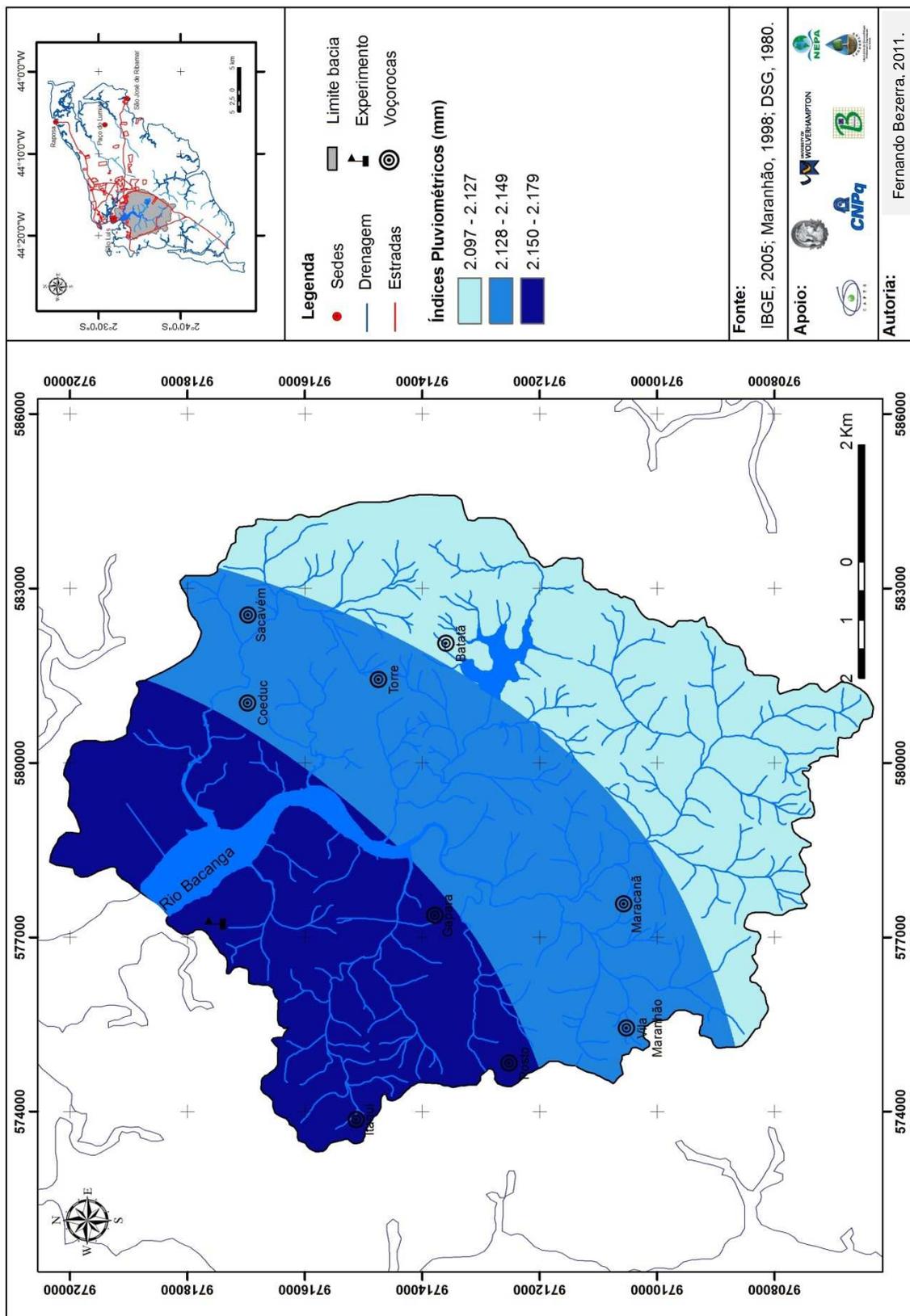


Figura 48 - Mapa de índices pluviométricos da bacia do rio Bacanga.

## 7.2 Espectrometria de fluorescência de raios X

A técnica de espectrometria de fluorescência de raios X permitiu a realização de análises diretamente sobre amostras sólidas, como por exemplo, nas 76 amostras de solos da área da bacia do rio Bacanga, sendo possível a identificação de diversos elementos que integram cada amostra ao mesmo tempo. Os elementos selecionados foram direcionados para identificação dos macronutrientes, que são importantes nos projetos de reabilitação de áreas degradadas, pois são essenciais na germinação e desenvolvimento da cobertura vegetal, seja pela correção do pH ou na aplicação do NPK. Nas análises de laboratório foram encontrados os macronutrientes: Fósforo (P), Potássio (K), Cálcio (Ca), Magnésio (Mg), e Enxofre (S).

É importante ressaltar que as áreas de coletas foram alteradas pela intervenção humana, o que pode ter mudado algumas propriedades físico-químicas do solo. Conforme já explicado na metodologia, a estação experimental já foi utilizada nas pesquisas de Mendonça (2006).

As análises dos teores dos macronutrientes nas voçorocas selecionadas e na estação experimental permitiram o conhecimento das características químicas dos solos da bacia do rio Bacanga, tendo em vista que nessas áreas, a erosão hídrica superficial sobre uma superfície sem cobertura vegetal, tende a carrear os elementos, bem como pelo processo de lixiviação.

Nesse contexto, a análise do potencial de Hidrogênio (pH) dos solos da área da bacia constitui um importante parâmetro nas análises sobre os macronutrientes do solo. Sathler (2010), analisando o pH de algumas voçorocas (Araçagi, Torre, Coeduc e Sacavém) no município de São Luís, concluiu que os solos são ácidos e

carecem de medidas corretivas. Os dados desse levantamento (SATHLER, 2010) são apresentados na tabela 7, sendo adaptados para a área de estudo.

Tabela 7 – Potencial de Hidrogênio (pH) das voçorocas do Coeduc, Sacavém e Torre.

Voçorocas (pH em H <sub>2</sub> O)		
Coeduc Cabeceira	Coeduc Lateral Direita	Coeduc Saída Esquerda
5,22	4,67	4,61
Sacavém Cabeceira	Sacavém Lateral Direita	Sacavém Saída Esquerda
5,30	4,66	4,56
Torre Cabeceira	Torre Lateral Direita	Torre Saída Esquerda
5,64	4,67	5,30

Fonte: SATLHER, 2010.

Kiehl (1979) considerando a influência do pH nos solos afirma que:

Solos com pH abaixo de 4,0 contém ácidos livres tais como o ácido sulfúrico oriundo da oxidação de sulfatos. Abaixo de pH 5,5 os solos minerais contém alumínio trocável, sendo que, quando com altos teores de matéria orgânica podem ter alumínio trocável até o pH 6,0. A faixa de pH 7,8 a 8,2 indica a presença de carbonato de cálcio e, acima de pH 8,2 o predomínio de Na<sup>+</sup> trocável, adsorvido no complexo e mais Na<sup>2</sup>Co<sup>3</sup>. O pH dos solos varia, de maneira geral, de 4,0 para solos fortemente ácidos, a 10,0 para solos alcalinos que contém Na<sup>2</sup>Co<sup>3</sup> (KIEHL, 1979).

O mesmo autor (KIEHL, 1979) ressalta a importância do pH nas relações solo e planta, destacando a sua influência sobre os macronutrientes:

A reação do solo é um importante fator na produção agrícola – florestal, influenciando na disponibilidade de nutrientes às raízes das plantas, propiciando condições favoráveis ou de toxidez; concorre, igualmente, para favorecer o desenvolvimento de microorganismos que operam transformações úteis para melhorar as condições do solo, como também podem concorrer para dar meio propício a microorganismos causadores de doenças às plantas. Os solos que têm o pH entre 5,8 e 7,5 tendem ser livres de problemas do ponto de vista do crescimento de plantas. Abaixo do pH 5, poderá haver deficiência de elementos Ca (cálcio), Mg (magnésio), P (fósforo), Mo (molibdênio), B (boro), ou toxidez de Al (alumínio), Mn (manganês), Zn (zinco) e outros metais pesados. A presença de pH entre 8,0 e 8,5 indica a ocorrência de carbonato de cálcio e/ou magnésio livres e baixas disponibilidades dos elementos P, Mn, Zn e Cu (cobre) (KIEHL, 1979).

Com base nessa afirmação, e considerando os dados de pH, os solos da bacia do rio Bacanga podem apresentar deficiências de elementos Ca (cálcio), Mg (magnésio), P (fósforo), Mo (molibdênio), B (boro), ou toxidez de Al (alumínio), Mn (manganês), Zn (zinco) e outros metais pesados. Nesse contexto a erosão hídrica e o processo de lixiviação desempenham uma importante função no deslocamento de sedimentos e dos macronutrientes do solo.

Em termos das áreas da bacia com cobertura vegetal, Reichardt & Timm (2004) consideram que o processo de transferência de nutrientes no solo é realizado através de dois processos: difusão e transporte de massa.

A difusão compreende o transporte devido a gradiente de potencial químico, medido pela atividade do íon em questão na solução do solo, e o transporte de massa se refere a todo transporte de íons arrastados pelo fluxo de água no solo. Além desses processos, a nutrição vegetal ainda é afetada pela extensão do sistema radicular das plantas. A questão pode ser posta da seguinte forma: ou o nutriente se move do solo para a raiz (difusão ou transporte de massa) ou a raiz de “dirige” ou cresce para o ponto onde encontra o nutriente (interceptação radicular) (REICHARDT & TIMM, 2004).

No tocante à fibra do buriti (*Mauritia flexuosa*) apresenta-se como um material com alto teor de celulose e baixo teor de lignina. A celulose é um dos componentes das células dos vegetais, aparecendo nas raízes, troncos, folhas, flores e sementes. As propriedades químicas da fibra do buri foram analisadas por Bhattacharyya, 2010 (Tabela 8).

Tabela 8 – Propriedades químicas da fibra do buriti.

<b>Fibra</b>	<b>Macronutrientes</b>				
<b>Buriti</b>	<b>P</b>	<b>K</b>	<b>Ca</b>	<b>Mg</b>	<b>S</b>
	g kg <sup>-1</sup>	g kg <sup>-1</sup>	g kg <sup>-1</sup>	g kg <sup>-1</sup>	g kg <sup>-1</sup>
	67,3	54,02	50,73	60	8,287

Fonte: (BHATTACHARYYA, 2010)

A análise dos macronutrientes do solo constitui um importante parâmetro para a caracterização dos parâmetros químicos da bacia do rio Bacanga, tendo em vista que os macronutrientes são elementos essenciais para o crescimento e o desenvolvimento das plantas, sendo absorvidos (e necessitados) em maiores quantidades (REICHARDT & TIMM, 2004). Essas análises são fundamentais nos trabalhos de reabilitação de áreas degradadas, pois influenciam a germinação e desenvolvimento da cobertura vegetal, sendo que dependendo dos teores desses elementos, estes deverão ser incorporados para garantir o sucesso da reabilitação.

Considerando a concentração de fósforo (P) nas amostras coletadas nas parcelas da estação experimental e nas voçorocas na bacia do rio Bacanga, as diferenças na concentração desse elemento entre esses pontos foram significativas na Análise de Variância ( $P < 0,001$ ). Considerando os valores médios, a concentração do fósforo (P) variou de  $0,219 \text{ g kg}^{-1}$  (Itaqui) a  $0,563 \text{ g kg}^{-1}$  (parcela com geotêxteis e gramíneas) (Tabela 9).

As diferenças foram significativas na concentração de fósforo (P) no teste *t student* entre as parcelas com geotêxteis com gramíneas e com solo exposto ( $P < 0,01$ ); Geotêxteis com gramíneas vs Batatã ( $P < 0,05$ ); Geotêxteis com gramíneas vs Coeduc ( $P < 0,05$ ); Geotêxteis com gramíneas vs Gapara ( $P < 0,05$ ); Geotêxteis com gramíneas vs Itaqui ( $P < 0,01$ ); Geotêxteis com gramíneas vs Posto ( $P < 0,001$ ); Geotêxteis com gramíneas vs Sacavém ( $P < 0,01$ ); Geotêxteis com gramíneas vs Torre ( $P < 0,05$ ); Geotêxteis com gramíneas vs Vila Maranhão ( $P < 0,001$ ); Solo exposto vs Batatã ( $P < 0,01$ ); Solo exposto vs Itaqui ( $P < 0,001$ ); Solo exposto vs Maracanã ( $P < 0,05$ ); Solo exposto vs Posto ( $P < 0,05$ ); Solo exposto vs Sacavém ( $P < 0,001$ ); Solo exposto vs Vila Maranhão ( $P < 0,01$ ); Batatã vs Coeduc ( $P < 0,05$ ); Batatã vs Maracanã ( $P < 0,05$ ); Coeduc vs Itaqui ( $P < 0,05$ ); Coeduc vs Sacavém

( $P < 0,05$ ); Gapara vs Itaqui ( $P < 0,05$ ); Gapara vs Sacavém ( $P < 0,05$ ); Itaqui vs Maracanã ( $P < 0,01$ ). Outras comparações não foram significativas pelo teste t ( $P > 0,05$ ) (Figura 49).

O fósforo (P) desempenha no solo uma importante função no crescimento dos vegetais, e sua falta pode impedir a assimilação de outros nutrientes, principalmente as leguminosas (BUCKMAN & BRADY, 1976), que são bastante utilizadas em projetos de reabilitação. No caso desta pesquisa a cobertura vegetal utilizada foi de gramíneas, bastante utilizadas nas pastagens da região. A disponibilidade de fósforo no solo para as pastagens na região Nordeste é deficiente, sendo fundamental no metabolismo das plantas, e sua ausência pode ocasionar decréscimo na produção de forragem (ARAÚJO *et al.*, 2010).

Araújo *et al.* (2010) investigando o uso do fósforo em gramíneas e leguminosas cultivadas em neossolo do Semi-Árido, concluíram que:

A adubação fosfatada incrementou significativamente a produção de matéria seca nas gramíneas e leguminosas, exceto para a cunhã. As doses de fósforo aplicadas no solo aumentaram principalmente os teores de fósforo na parte aérea das gramíneas e leguminosas (ARAÚJO *et al.*, 2010).

Silva *et al.* (2006) aplicaram teores de fósforos em áreas de pastagens degradadas na Amazônia central e afirmaram que:

Os teores de fósforo encontrados na camada superficial dos tratamentos que sofreram calagem foram maiores pelo fato da correção da acidez do solo contribuir para aumentar a disponibilidade do fósforo no solo e, também, aumentar a eficiência dos fertilizantes fosfatados aplicados (SILVA *et al.*, 2006)

Castro *et al.* (2002), analisando os efeitos do lodo de esgoto como recuperados de áreas degradadas com finalidade agrícola na Fazenda Experimental do Cangüiri - município de Pinhais – PR, constataram que os teores de fósforo foram estatisticamente superiores nos tratamentos com lodo de esgoto. Verificou-se também tendência de acúmulo de fósforo nas parcelas que tiveram maior perda de solo (Castro *et al.*, 2002).

Tabela 9 – Valores médios dos macronutrientes na estação experimental e nas voçorocas na bacia do rio Bacanga (n = número de amostras).

Pontos Amostrais	Macronutrientes (g kg <sup>-1</sup> )					n
	P	K	Ca	Mg	S	
GE	0,563	0,983	3,141	0,817	0,040	20
SE	0,446	1,143	4,349	0,820*	0,042*	20
Batatã	0,257	1,478	1,134	0,855	0,015*	4
Coeduc	0,400	0,607	0,314	0,833	0,010*	4
Gapara	0,379	0,082	0,216	0,775	0,002**	4
Itaqui	0,219	0,254	0,218	0,775	0,002**	4
Maracanã	0,345	0,201	0,279	0,788	0,009*	4
Posto	0,317	0,582	0,230	0,855	0,002**	4
Sacavém	0,242	0,311	0,233	0,770	0,002**	4
Torre	0,348	0,491	0,313	0,853	0,002**	4
Vila Maranhão	0,280	0,339	0,238	0,823	0,002**	4

\*a variável não tem distribuição normal em nível de 1% de significância (P<0,01) pelo teste de Anderson-Darling; \*\*as variáveis são idênticas

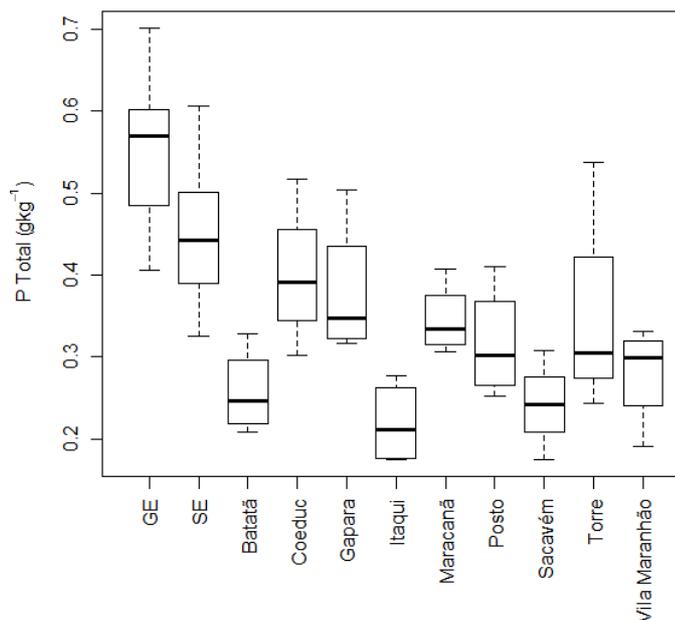


Figura 49 – Diferenças na concentração de Fósforo (P) nos pontos amostrais.

Autoria: Bezerra, 2011.

Em relação à concentração de potássio (K) na estação experimental e nas voçorocas da área de estudo, as diferenças observadas na concentração desse elemento foram significativas na Análise de Variância ( $P < 0,001$ ). Os valores médios da concentração de potássio (K) variaram de  $0,082 \text{ g kg}^{-1}$  (Gapara) a  $1,478 \text{ g kg}^{-1}$  (Batatã) (Tabela 9).

As comparações foram significativas na concentração de Potássio (K) no teste *t student* entre os seguintes pontos: Geotêxteis com gramíneas vs Gapara ( $P < 0,001$ ); Geotêxteis com gramíneas vs Itaqui ( $P < 0,01$ ); Geotêxteis com gramíneas vs Maracanã ( $P < 0,001$ ); Geotêxteis com gramíneas vs Posto ( $P < 0,05$ ); Geotêxteis com gramíneas vs Sacavém ( $P < 0,05$ ); Geotêxteis com gramíneas vs Vila Maranhão ( $P < 0,001$ ); Solo exposto vs Gapara ( $P < 0,001$ ); Solo exposto vs Itaqui ( $P < 0,001$ ); Solo exposto vs Maracanã ( $P < 0,001$ ); Solo exposto vs Posto ( $P < 0,01$ ); Solo exposto vs Sacavém ( $P < 0,01$ ); Solo exposto vs Torre ( $P < 0,05$ ); Batatã vs Coeduc ( $P < 0,05$ ); Gapara vs Maracanã ( $P < 0,05$ ); Gapara vs Posto ( $P < 0,05$ ); Gapara vs Sacavém

( $P < 0,05$ ); Gapara vs Vila Maranhão ( $P < 0,05$ ); Maracanã vs Posto ( $P < 0,05$ ). Outras comparações não foram significativas pelo teste t ( $P > 0,05$ ) (Figura 50).

O potássio assimilável no solo relaciona-se diretamente com o vigor dos vegetais em crescimento, neutralizando também a influência perniciosa do excesso do nitrogênio, sendo importante à formação do amido e à transferência dos açúcares (BUCKMAN & BRADY, 1976). De um modo geral, os solos brasileiros sofrem com a falta do potássio (K), devido à facilidade de lixiviação desse elemento no perfil do solo, pois ele é absorvido pelos vegetais na forma solúvel (LOSHITERU, 2003).

Oliveira (2008) estudando os atributos químicos e físicos de um solo submetido a diferentes tipos de uso no Acre, concluiu que:

O potássio decresceu drasticamente na pastagem, possivelmente devido às perdas por erosão, queima e pastejo. Os dados demonstram uma acidez elevada ( $\text{pH} < 5$ ) e a alta quantidade de potássio no solo em todas as profundidades, havendo um acréscimo na acidez e um decréscimo do teor de  $\text{K}^+$  em profundidade (OLIVEIRA, 2008).

Bond (2009) avaliando os efeitos sobre o solo e planta da aplicação de resíduo da produção de enzimas em pastagem no Rio Grande do Sul, afirmou que os teores de potássio:

Apresentaram sempre muito relacionados com a profundidade amostrada, para todas as coletas, onde os maiores teores sempre foram observados nos 10 cm iniciais e decresciam conforme o aumento da profundidade. Isso era esperado, visto que o K é um dos elementos mais associados a ciclagem de nutrientes (BOND, 2009).

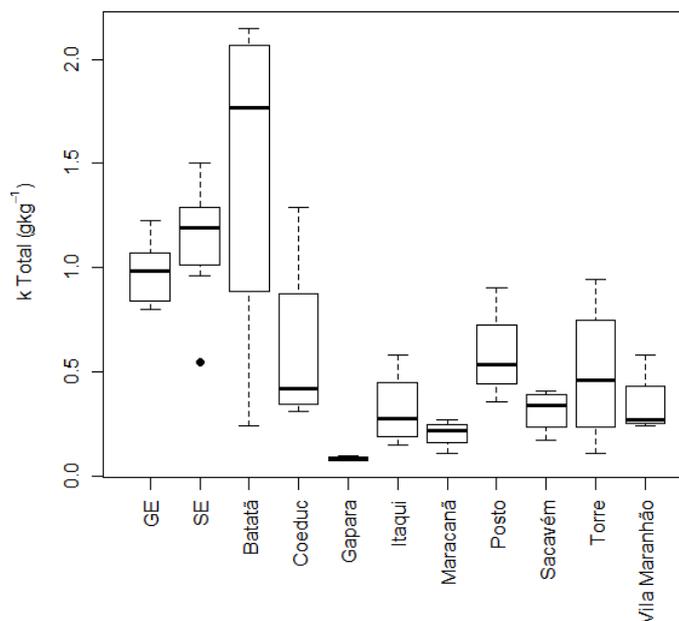


Figura 50 – Diferenças na concentração de Potássio (K) nos pontos amostrais.

Autoria: Bezerra, 2011.

Em se tratando da concentração de cálcio (Ca) no experimento e nos processos erosivos da bacia, as comparações entre os valores na concentração do elemento químico foram significativas na Análise de Variância ( $P < 0,001$ ). Os dados obtidos da concentração de cálcio (Ca) variaram de  $0,216 \text{ g kg}^{-1}$  (Gapara) a  $4,349 \text{ g kg}^{-1}$  (parcela com solo exposto) (Tabela 9).

As diferenças foram significativas na concentração de Cálcio (Ca) de acordo com o teste *t student* nas áreas: Geotêxteis com gramíneas vs Batatã ( $P < 0,01$ ); Geotêxteis com gramíneas vs Coeduc ( $P < 0,05$ ); Geotêxteis com gramíneas vs Gapara ( $P < 0,05$ ); Geotêxteis com gramíneas vs Itaqui ( $P < 0,05$ ); Geotêxteis com gramíneas vs Maracanã ( $P < 0,05$ ); Geotêxteis com gramíneas vs Posto ( $P < 0,05$ ); Geotêxteis com gramíneas vs Sacavém ( $P < 0,05$ ); Geotêxteis com gramíneas vs Torre ( $P < 0,05$ ); Geotêxteis com gramíneas vs Vila Maranhão ( $P < 0,05$ ); Solo exposto vs Batatã ( $P < 0,001$ ); Solo exposto vs Gapara ( $P < 0,05$ ); Solo exposto vs Itaqui ( $P < 0,05$ ); Solo exposto vs Maracanã ( $P < 0,05$ ); Solo exposto vs Posto ( $P < 0,05$ ); Solo

exposto vs Sacavém ( $P < 0,05$ ); Solo exposto vs Vila Maranhão ( $P < 0,01$ ); Coeduc vs Gapara ( $P < 0,05$ ); Coeduc vs Itaqui ( $P < 0,05$ ); Coeduc vs Posto ( $P < 0,01$ ); Gapara vs Torre ( $P < 0,05$ ); Itaqui vs Torre ( $P < 0,05$ ). Outras comparações não foram significativas pelo teste t ( $P > 0,05$ ) (Figura 51).

O cálcio é considerado um macronutriente secundário, podendo ser encontrado na calcita, gesso, concha de ostras e corais. As principais fontes de Ca são os minerais das rochas sedimentares, destacando-se o calcário e a dolomita. Em regiões úmidas, como no Norte do Maranhão, onde os solos são ácidos, este elemento tende a ser lixiviado. O cálcio é um elemento essencial para o desenvolvimento das plantas. A absorção de Ca em contato com a raiz se faz essencialmente, por fluxo de massa, necessitando de maior umidade no solo (SOUZA, 2008).

Analisando os teores de cálcio nas lavouras de café da na Região Sul de Minas Gerais, Carvalho (2008) afirmou que:

O teor de cálcio alto está associado a baixo teor de alumínio e alumínio alto jamais ocorrerá se o cálcio estiver alto. A presença de cálcio em baixas concentrações estimula a absorção de outros íons-aumenta, por exemplo, a do potássio: trata-se do chamado “Efeito Viets”. Esse papel do cálcio sugere a importância de se manter no solo um nível do elemento, para garantir, entre outras coisas, a absorção adequada dos elementos e, através disso, a produção (CARVALHO, 2008).

Faria & Santos (2007) estudando a recuperação de áreas degradadas com lodo primário de esgoto urbano no município de Goiânia, dando ênfase ao aumento do teor de cálcio no solo, chegou aos seguintes resultados:

Relacionado às camadas inferiores, no tratamento com biossólido foi verificado um aumento significativo da matéria orgânica na camada 10 – 30 cm, ficando evidente a tendência de elevação de pH com a aplicação do biossólido. Os valores de cálcio no solo na profundidade de 0 – 10 e 10 – 30 cm, responderam positivamente à adição deste elemento através da inserção do lodo mostrando diferenças significativas de concentração, resultando em uma elevação nos teores de cálcio no solo (FARIA & SANTOS, 2007).

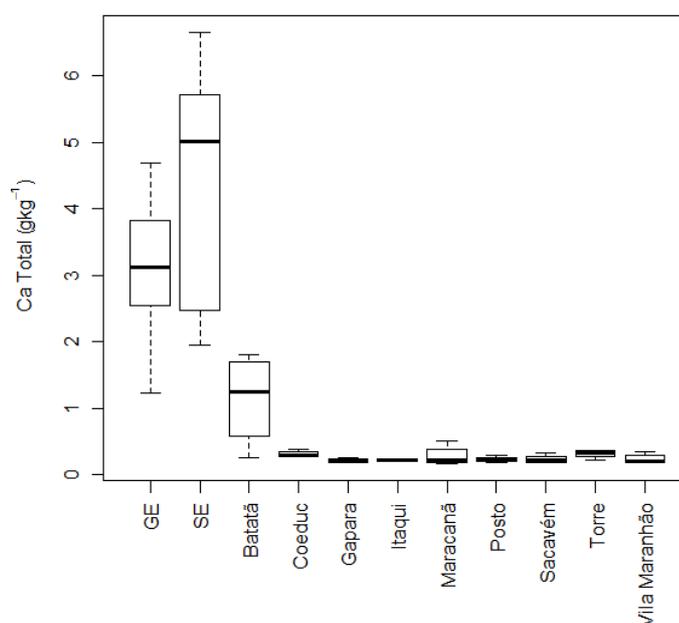


Figura 51 – Diferenças na concentração de Cálcio (Ca) nos pontos amostrais.

Autoria: Bezerra, 2011.

A concentração de magnésio (Mg) nas amostras coletadas nas parcelas do experimento e nas voçorocas selecionadas, apresentou diferenças significativas no teste não-paramétrico de Kruskal-Wallis ( $P < 0,01$ ). Considerando os valores médios, a concentração de Magnésio (Mg) variou de  $0,770 \text{ g kg}^{-1}$  (Sacavém) a  $0,855 \text{ g kg}^{-1}$  (Batatã e Posto) (Tabela 9).

As diferenças foram significativas na concentração de Magnésio (Mg) no teste de Mann-Whitney entre: Geotêxteis com gramíneas vs Itaquí ( $P < 0,01$ ); Geotêxteis com gramíneas vs Maracanã ( $P < 0,01$ ); Geotêxteis com gramíneas vs Sacavém ( $P < 0,01$ ); Solo exposto vs Itaquí ( $P < 0,01$ ); Solo exposto vs Maracanã ( $P < 0,01$ ); Solo exposto vs Sacavém ( $P < 0,01$ ); Batatã vs Maracanã ( $P < 0,05$ ); Batatã vs Sacavém ( $0,05$ ); Coeduc vs Itaquí ( $P < 0,05$ ); Coeduc vs Maracanã ( $P < 0,05$ ); Coeduc vs Sacavém ( $P < 0,05$ ); Itaquí vs Posto ( $P < 0,05$ ); Itaquí vs Torre ( $P < 0,05$ ); Maracanã vs Posto ( $P < 0,05$ ); Posto vs Sacavém ( $P < 0,05$ ). Outras comparações não foram significativas pelo teste Mann-Whitney ( $P > 0,05$ ) (Figura 52).

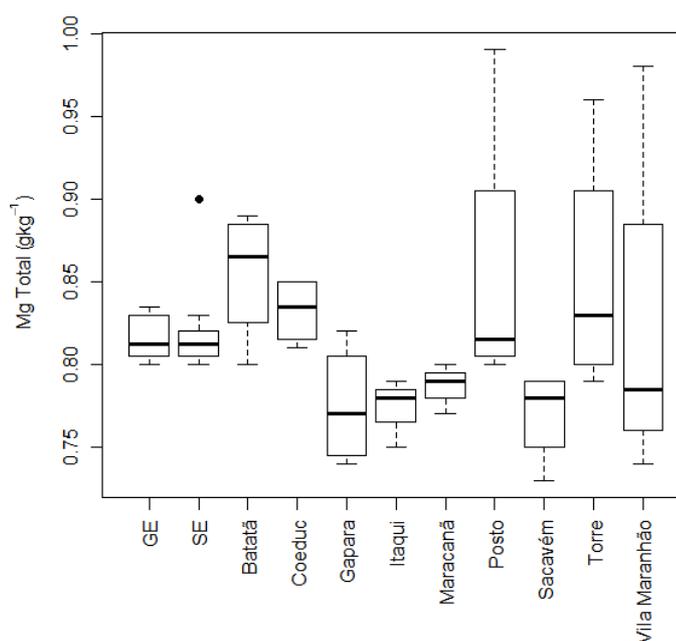


Figura 52 – Diferenças na concentração de Magnésio (Mg) nos pontos amostrais.

Autoria: Bezerra, 2011.

O magnésio (Mg) é considerado um macronutriente secundário, encontrando-se no solo nas formas não-trocável, trocável e solução do solo. A ocorrência desse elemento depende do grau de intemperismo, diminuindo seu teor em solos altamente intemperizados, tendo forte potencial de lixiviação. A sua deficiência é um grande problema nos solos ácidos, como no caso da bacia da área de estudo. A absorção do Mg pelos vegetais dependem do teor trocável; dos teores de K, Ca e Al e; do teor de umidade no solo (SOUZA, 2008).

Nascimento *et al.* (2010), investigando os teores de macronutrientes no solo sob três sistemas de manejo distintos em Pernambuco: 1. Plantio de mandioca com ausência de qualquer manejo conservacionista; 2. Pousio por seis meses após perda da produtividade da cultura; e 3. Uma área com mata nativa; encontraram o seguinte teor de magnésio:

O teor de magnésio no sistema de pousio foi significativamente inferior aqueles observados para os demais sistemas de manejo ao qual o solo estava submetido, sendo de 0,56 e 0,76 Cmolc Kg<sup>-1</sup> de solo, respectivamente, para os sistemas com plantio de mandioca e mata, os quais não diferiram significativamente entre si (NASCIMENTO *et al.*, 2010).

Pereira Junior (2006), analisando o efeito do pisoteio ovino sobre atributos do solo, em área de coqueiral na Paraíba, afirmou que:

Os resultados indicaram teores altos de magnésio em todos os tratamentos antes e depois do pisoteio ovino. Nota-se que houve efeito significativo ao nível de 5% de probabilidade depois de aplicados os tratamentos. Observa-se que, comparando as médias dos tratamentos com dois animais (Da), quatro animais (Qa) e seis animais (Sa), ocorreu um decréscimo nos teores de magnésio em relação a testemunha sem animais (sa) (PEREIRA JR., 2006).

Em relação à concentração de enxofre (S) na estação experimental e nas voçorocas da área de estudo, as diferenças observadas na concentração desse elemento foram significativas no teste de Kruskal-Wallis ( $P < 0,001$ ). Os valores médios da concentração de enxofre (S) variaram de 0,009 g kg<sup>-1</sup> (Maracanã) a 0,042 g kg<sup>-1</sup> (Parcela com solo exposto) (Tabela 9).

As comparações foram significativas na concentração de Enxofre (S) no teste de Mann-Whitney entre os pontos amostrais: Geotêxteis com gramíneas vs Gapara ( $P < 0,05$ ); Geotêxteis com gramíneas vs Itaqui ( $P < 0,05$ ); Geotêxteis com gramíneas vs Posto ( $P < 0,05$ ); Geotêxteis com gramíneas vs Sacavém ( $P < 0,05$ ); Geotêxteis com gramíneas vs Torre ( $P < 0,05$ ); Geotêxteis com gramíneas vs Vila Maranhão ( $P < 0,05$ ); Solo exposto vs Gapara ( $P < 0,05$ ); Solo exposto vs Itaqui ( $P < 0,05$ ); Solo exposto vs Posto ( $P < 0,05$ ); Solo exposto vs Sacavém ( $P < 0,05$ ); Solo exposto vs Torre ( $P < 0,05$ ); Solo exposto vs Vila Maranhão ( $P < 0,05$ ). Outras comparações não foram significativas pelo teste Mann-Whitney ( $P > 0,05$ ) (Figura 53).

O enxofre (S) no solo é um importante elemento para o desenvolvimento das plantas, sendo influenciado pelas transformações microbianas e pelas condições ambientais que afetam a composição e a atividade dos microrganismos. Grande parte do enxofre está disponível sob a forma orgânica, que, através da atividade microbiana, é convertido em produtos disponíveis para a planta. O enxofre é absorvido do solo na forma de sulfato (CARVALHO, 2008).

Rezende (2005) analisando a influência da aplicação do lodo de esgoto (Biossólido) sobre a concentração e o estoque de nutrientes na biomassa do subsolo no estado de São Paulo, encontrou os seguintes resultados em relação ao enxofre:

Observou-se uma diferença significativa nos teores de enxofre entre os tratamentos na profundidade de 0 – 10 cm. Apesar do enxofre aplicado com o biossólido, notou-se que há diminuição na disponibilidade deste elemento em relação à testemunha (sem adubação e sem aplicação de lodo de esgoto). Pode estar havendo uma inibição na liberação do enxofre devido à matéria orgânica e ao fósforo contido no biossólido. Nota-se também, que houve uma tendência de aumento de enxofre nas camadas inferiores, podendo indicar uma possível lixiviação desse elemento no solo (REZENDE, 2005).

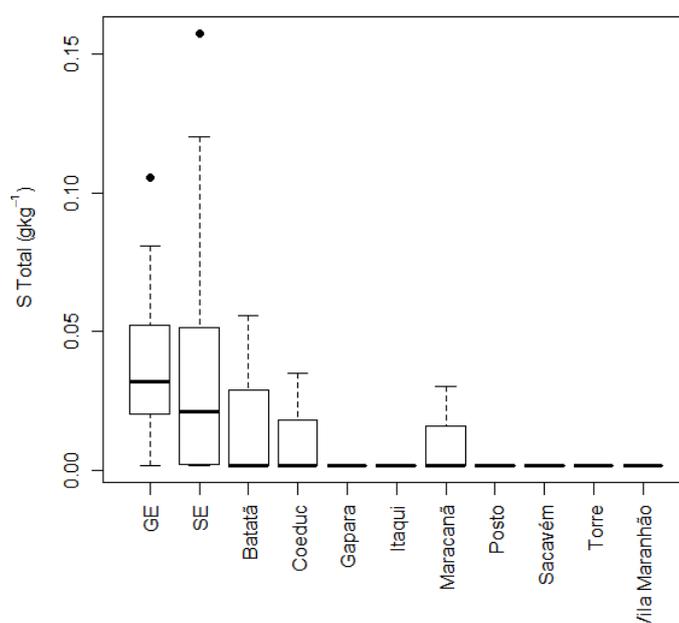


Figura 53 – Diferenças na concentração de Enxofre (S) nos pontos amostrais.

Autoria: Bezerra, 2011.

### 7.3 Análise granulométrica

De acordo com a classificação do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA), as texturas dos sedimentos nas nove voçorocas selecionadas na bacia do rio Bacanga constam de 2,78% argilo-siltoso, 2,78% franco argilo-siltoso, 5,55% areia, 8,33% franco-arenoso, 25% silte, e 55,55% franco-siltoso (Figura 54). Seguindo a mesma classificação na estação experimental, 40% das amostras na parcela com geotêxteis e gramíneas (GE) correspondem à fração franco-siltoso e 60% silte (Figura 54), enquanto no experimento com solo exposto (SE), 40% são caracterizadas por silte e 60% franco-siltoso (Tabelas 10, 11). Na estação experimental, as diferenças encontradas em áreas próximas podem está relacionadas aos procedimentos adotados por Mendonça (2006), que utilizou camadas de silte, argila e de terra preta, conforme já explicitado na metodologia.

Os solos com essa textura são friáveis e extremamente fragilizados pela ação da água no período chuvoso, e pela ação eólica no período de estiagem. Na profundidade analisada, houve homogeneidade na distribuição granulométrica, com predomínio dos mais finos (textura franco-siltosa). Essas características podem ter facilitado o transporte do material superficial, que foi observado nas parcelas com solo exposto e nas taxas de evolução das cabeceiras, conforme dados apresentados por Mendonça (2002); Mendonça (2003); Bezerra *et al.* (2005); Sathler *et al.* (2005); Furtado *et al.* (2006); Bezerra e Guerra (2007); Bezerra *et al.* (2009).

Ikematsu *et al.* (2007), caracterizando a textura de duas voçorocas (V1 e V2) no município de Sorocaba (SP), sendo que V1 está localizada em uma área de

periferia urbana e V2 está numa cabeceira de um córrego, chegaram aos seguintes resultados:

Para o caso da V1, é predominantemente formado por grãos de areia (54%) e a textura é franco-argilo-arenosa. O solo localizado na alta vertente da área de drenagem da V2 possui granulometria predominantemente arenosa (76 a 80%) e textura classificada como franco-arenosa em ambas as profundidades (0-30 cm e 30 - 50 cm). O solo na média vertente da área de drenagem da V2, com granulometria predominantemente arenosa (76 a 82%) e textura classificada como franco-arenosa no horizonte sub-superficial. O solo na baixa vertente da área de drenagem da V2, com granulometria predominantemente arenosa e textura classificada como franco-arenosa em ambas as profundidades. Horizonte A moderado e B latossólico. Erosão laminar aparente média-forte (IKEMATSU *et al.*, 2007).

Sathler *et al.* (2010) utilizando o Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCs) para a caracterização da textura de quatro voçorocas na Ilha do Maranhão, a saber: Araçagy, Bacanga (Torre), Coeduc e Sacavém, concluíram que:

A classe SUCs mais comum é SM – areia siltosa, e ocorre em todas as feições analisadas. A segunda classe em recorrência é CL – argila pouco plástica, quase sempre arenosa ou com areia. Notam-se ainda as classes SP-SM (areia mal graduada com silte); SC (areia argilosa); CH (argila muito plástica – com areia); e SM – SC (areia silto-argilosa) (SATHLER *et al.*, 2010).

Sathler *et al.* (2009) também analisando sobre as frações granulométricas de quatro voçorocas na Ilha do Maranhão (Araçagy, Bacanga (Batatã), Coeduc e Sacavém) encontraram os seguintes resultados:

Predominância da fração areia em todas as feições, o que determina a maior representação percentual de classes arenosas. Maiores percentuais de argila são encontrados no Araçagi, onde se observam camadas argilosas plásticas e muito plásticas (tátil) em profundidades abaixo de três metros, com espessuras superiores a um metro. As demais feições apresentam quase a totalidade de amostras com percentuais de argila abaixo dos 25%, bem como altos percentuais de areia fina e/ou silte. Embora nestes casos as camadas argilosas também estejam presentes, são menos representativas, sendo menos espessas (SATHLER *et al.*, 2009).

Quanto à granulometria das parcelas, os dados obtidos diferem dos resultados alcançados por Bezerra (2006) que analisou a granulometria de duas parcelas localizadas na Fazenda do Glória (Uberlândia – MG), uma com solo exposto e outra com geotêxteis e gramíneas, na profundidade de 15 cm num Latossolo Vermelho, tendo o predomínio de areia fina (48,7%), seguida de 22,4% de argila, e 19,7% de areia grossa e 9,1% de silte.

Tabela 10 – Resultados das análises granulométricas nas voçorocas da bacia do rio Bacanga.

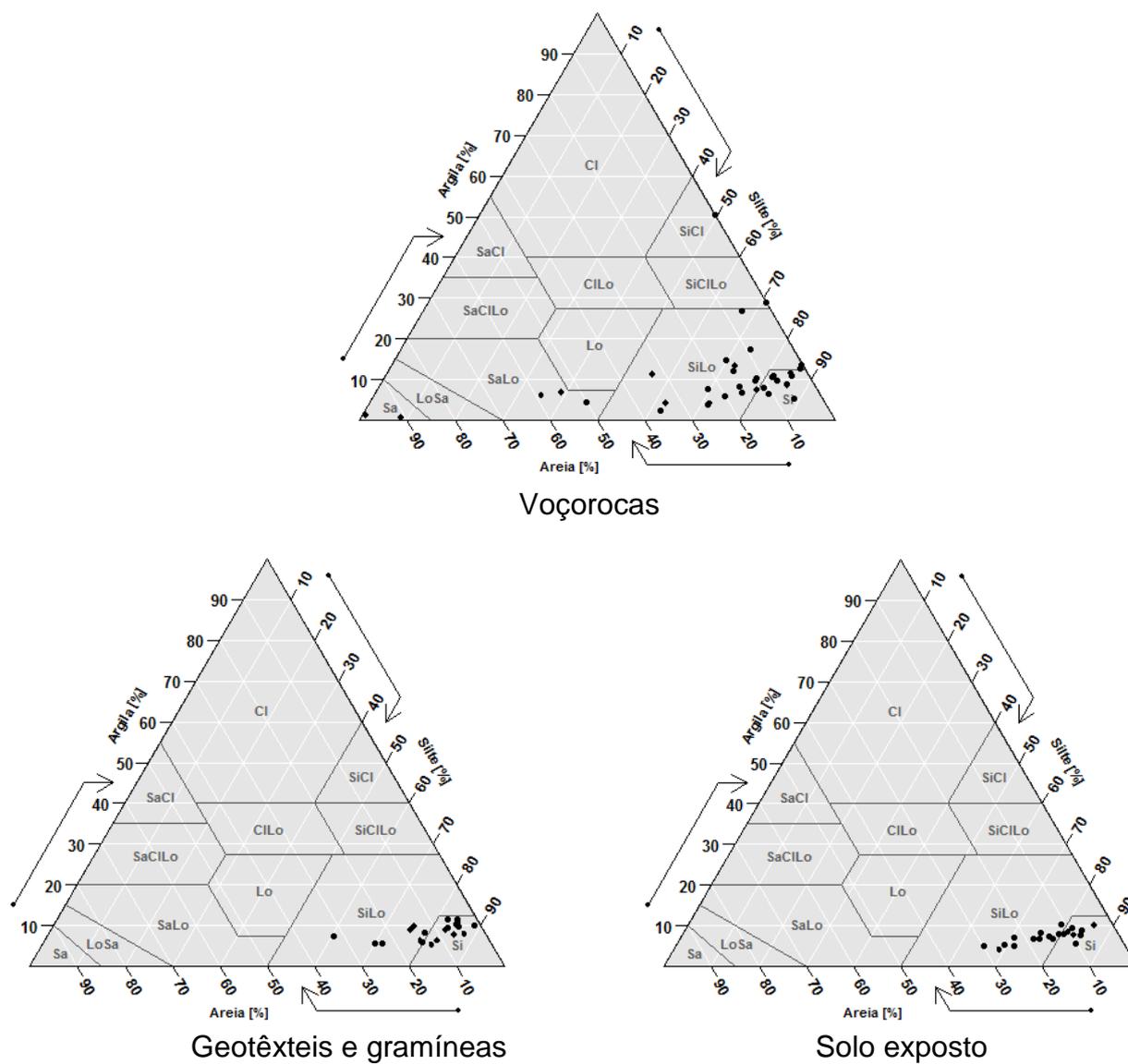
<b>Pontos</b>	<b>Argila (%)</b>	<b>Silte (%)</b>	<b>Areia (%)</b>	<b>Total (%)</b>
Batatã (P1)*	4,38	45,56	50,06	100
Batatã (P2)*	3,79	71,46	24,75	100
Batatã (P3)*	4,23	62,28	33,49	100
Batatã (P4)*	11,59	84,82	3,59	100
Coeduc (P1)*	7,85	81,1	11,05	100
Coeduc (P2)*	6,9	38,89	54,21	100
Coeduc (P3)*	6,22	35,01	58,77	100
Coeduc (P4)*	4,22	71,29	24,49	100
Gapara (P1)*	9,75	83,05	7,2	100
Gapara (P2)*	7,47	79,83	12,7	100
Gapara (P3)*	10,59	81,55	7,86	100
Gapara (P4)*	8,69	85,52	5,79	100
Itaqui (P1)*	10,85	81,67	7,48	100
Itaqui (P2)*	12,62	86,35	1,03	100
Itaqui (P3)*	14,64	69,83	15,53	100
Itaqui (P4)*	13,67	86,11	0,22	100
Maracanã(P1)*	26,83	67,08	6,09	100
Maracanã(P4)*	28,94	71,01	0,05	100
Posto (P2)*	9,73	78,36	11,91	100
Sacavém (P1)*	11,35	55,88	32,77	100
Sacavém (P3)*	7,58	69,45	22,97	100
Sacavém (P4)*	6,41	82,74	10,85	100
Torre (P1)*	0,72	8,25	91,03	100
Torre (P2)*	6,68	77,01	16,31	100
Torre (P3)*	10,38	78,23	11,39	100
Torre (P4)*	5,89	74,01	20,1	100
Vila MA(P1)*	50,4	49,6	0	100
Vila MA(P2)*	10,83	85,53	3,64	100
Vila MA(P3)*	2,27	62,09	35,64	100
Vila MA(P4)*	5,35	88,81	5,84	100

Autoria: Bezerra, 2010. \* Amostragem aleatória na superfícies das voçorocas.

Tabela 11 – Resultados das análises granulométricas nas parcelas com Geotêxteis com gramíneas (GE) e Solo Exposto (SE) e na estação experimental.

<b>Pontos (m)</b>	<b>Argila (%)</b>	<b>Silte (%)</b>	<b>Areia (%)</b>	<b>Total (%)</b>
GEa (0.5)	10,66	84,9	4,44	100,00
GEa (1.5)	7,80	85,47	6,73	100,00
GEa (2.5)	5,37	81,94	12,69	100,00
GEa (3.5)	6,35	79,15	14,5	100,00
GEa (4.5)	8,95	83,09	7,96	100,00
GEa (5.5)	8,18	79,25	12,57	100,00
GEa (6.5)	5,86	79,81	14,33	100,00
GEa (7.5)	10,02	88,61	1,37	100,00
GEa (8.5)	5,52	71,57	22,91	100,00
GEa (9.5)	9,33	83,53	7,14	100,00
GEb (0.5)	7,41	60,27	32,32	100,00
GEb (1.5)	8,98	75,55	15,47	100,00
GEb (2.5)	5,68	69,81	24,51	100,00
GEb (3.5)	11,50	82,29	6,21	100,00
GEb (4.5)	9,88	76,08	14,04	100,00
GEb (5.5)	6,37	82,71	10,92	100,00
GEb (6.5)	11,39	84,42	4,19	100,00
GEb (7.5)	10,30	84,68	5,02	100,00
GEb (8.5)	8,04	87,51	4,45	100,00
GEb (9.5)	9,67	85,47	4,86	100,00
SEa (0.5)	5,04	71,52	23,44	100,00
SEa (1.5)	8,04	80,54	11,42	100,00
SEa (2.5)	7,35	77,66	14,99	100,00
SEa (3.5)	10,15	85,76	4,09	100,00
SEa (4.5)	6,75	78,89	14,36	100,00
SEa (5.5)	7,59	84,32	8,09	100,00
SEa (6.5)	6,84	76,02	17,14	100,00
SEa (7.5)	7,96	79,39	12,65	100,00
SEa (8.5)	6,67	74,66	18,67	100,00
SEa (9.5)	4,99	65,09	29,92	100,00
SEb (0.5)	7,76	82,77	9,47	100,00
SEb (1.5)	6,99	70,59	22,42	100,00
SEb (2.5)	8,59	81,11	10,3	100,00
SEb (3.5)	4,21	68,72	27,07	100,00
SEb (4.5)	10,29	78,74	10,97	100,00
SEb (5.5)	5,22	69,33	25,45	100,00
SEb (6.5)	9,43	81,62	8,95	100,00
SEb (7.5)	8,21	75,62	16,17	100,00
SEb (8.5)	8,74	84,03	7,23	100,00
SEb (9.5)	5,59	84,35	10,06	100,00

Autoria: Bezerra, 2010.



<b>abv</b>	<b>Nome</b>
Cl	Argila
SiCl	Argilo-siltoso
SaCl	Areno-argilosa
ClLo	Franco argiloso
SiClLo	Franco argilo-siltoso
SaClLo	Franco argilo-arenoso

<b>abv</b>	<b>Nome</b>
Lo	Franco
SiLo	Franco siltoso
SaLo	Franco arenoso
Si	Silte
LoSa	Areia-franca
Sa	Areia

Figura 54 – Diagrama triangular dos pontos amostrais na estação experimental e nas voçorocas na bacia do rio Bacanga. Autoria: Bezerra, 2011.

A análise granulométrica dos pontos de amostragem na área da bacia do Bacanga permitiu a comparação entre as voçorocas e as parcelas experimentais. De um modo geral, a maior diferença entre o conteúdo de argila nos locais de coleta das amostras de solos foi entre as voçorocas Vila Maranhão e Torre que chegou a 190,87% (112,95 g kg<sup>-1</sup>), enquanto a menor diferença observada foi entre as voçorocas Batatã e Torre que foi apenas 1,35% superior (0,80 g kg<sup>-1</sup>). No que concerne a estação experimental, a fração argila na parcela com geotêxteis e gramíneas foi 14,4% maior que na parcela com solo exposto (Figura 55).

Os teores de argila no solo podem apresentar uma resistência em sofrer erodibilidade, pois as partículas de argilas tem as seguintes peculiaridades segundo Belinazzi *et al.* (1991):

É a que possui maior superfície específica de contato entre as partículas de solo, apresenta ainda cargas elétricas negativas responsáveis em sua grande maioria pela Capacidade de Troca Catiônica (CTC). Favorecendo com isto a sua ligação com cátions positivos, favorecendo ainda uma maior agregação deste solo, bem como uma maior quantidade quanto ao valor de Saturação por Bases (BELINAZZI *et al.*, 1991).

Quanto ao conteúdo de silte (Figura 56), a maior diferença encontrada foi entre as erosões Gapara e Maracanã que foi 47,35% superior (265,08 g kg<sup>-1</sup>). Por outro lado a menor diferença correspondeu às voçorocas Coeduc e Maracanã, na qual atingiu 1,06% (5,93 g kg<sup>-1</sup>). No tocante a fração silte (Figura 56) no experimento, a parcela GE (Geotêxteis e gramíneas) obteve 3,57% maior quantidade desse diâmetro que a parcela SE (Solo exposto). O conteúdo de areia (Figura 57) na voçoroca do Coeduc foi 512,20% (310,65 g kg<sup>-1</sup>) maior que o Itaqui, sendo que esta foi à maior diferença encontrada. Em contrapartida, a parcela GE teve 0,46% (0,52 g kg<sup>-1</sup>) que a Vila Maranhão. Comparando as duas parcelas, SE foi 33,64% superior no conteúdo de areia que a parcela GE.

O predomínio das frações argila e silte pode facilitar o processo de impermeabilização das camadas superficiais, a partir do deslocamento das partículas do solo pela erosão por salpicamento, nas superfícies sem cobertura vegetal, que selam os poros do solo, formando encrostamento e diminuindo as taxas de infiltração, e conseqüentemente, acelerando a geração do escoamento superficial.

Bhattacharyya (2010) analisando o conteúdo de argila em cinco parcelas de erosão (10 x 1 m cada) com diferentes tratamentos (com réplicas), em *Hilton Experimental Site* (Shropshire, Reino Unido), a saber: (1) Solo exposto (D1, D6); (2) Gramíneas (D3, D7); (3) solo exposto com 1 m<sup>2</sup> de geotêxteis de *Borassus* (*Borassus aethiopum*) (D4, D9); (4) Completamente coberta com geotêxteis de *Borassus* (D2, D8); e solo exposto com 1 m<sup>2</sup> de geotêxteis de *Buriti* (*Mauritia flexuosa*), chegou aos resultados:

A comparação dos dados indicou que o conteúdo inicial de argila nas parcelas com solo exposto foi ~29% maior que as parcelas com gramíneas (31.4 g kg<sup>-1</sup> solo). Similarmente, as parcelas cobertas completamente com geotêxteis de *Borassus* obteve ~26% maior conteúdo de argila que as parcelas com gramíneas. Uma análise mais detalhada dos resultados, mostrou que a quantidade de argila na parcela D3 foi ~35% maior que a D7 (26.7 g kg<sup>-1</sup> solo). Do mesmo modo, o tratamento D4 obteve ~107% mais argila que D 9 (23.7 g kg<sup>-1</sup> solo) e a parcela D5 teve ~61% maior quantidade de argila que a D10 (27.7 g kg<sup>-1</sup> solo) (BHATTACHARYYA, 2010).

Em se tratando do silte, pesquisas realizadas por diferentes estudos vêm comprovando que solos mais siltosos tem maior suscetibilidade à erosão (GUERRA, 1990, 1996, 1999; MORGAN, 1981; e POESEN *et al.*,1999). As argilas às vezes dificultam a infiltração, mas são difíceis de serem removidas (CUNHA, 2006)

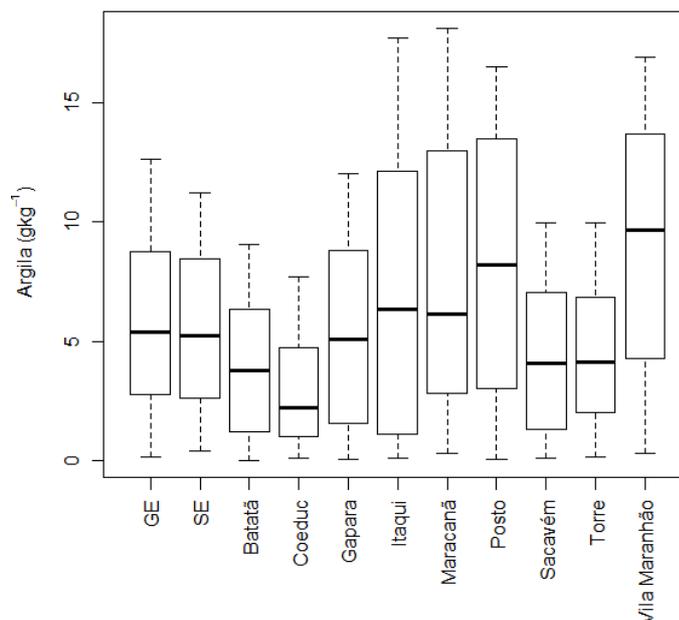


Figura 55 - Conteúdo de argila dos pontos amostrais na estação experimental e nas voçorocas na bacia do rio Bacanga. Autoria: Bezerra, 2011.

A fração argila nas amostras coletadas nas parcelas do experimento e nas voçorocas selecionadas apresentou diferenças significativas no teste paramétrico de Análise de Variância ( $P < 0,01$ ). As diferenças foram significativas no conteúdo de argila pelo teste *t student* entre os seguintes pontos de coletas: Geotêxteis com gramíneas vs Coeduc ( $P < 0,05$ ); Solo exposto vs Coeduc ( $P < 0,05$ ); Solo exposto vs Vila Maranhão ( $P < 0,05$ ); Batatã vs Maracanã ( $P < 0,05$ ); Batatã vs Vila Maranhão ( $P < 0,01$ ); Coeduc vs Gapara ( $P < 0,05$ ); Coeduc vs Maracanã ( $P < 0,01$ ); Coeduc vs Posto ( $P < 0,01$ ); Coeduc vs Vila Maranhão ( $P < 0,001$ ); Gapara vs Vila Maranhão ( $P < 0,05$ ); Maracanã vs Sacavém ( $P < 0,03$ ); Maracanã vs Torre ( $P < 0,05$ ); Posto vs Sacavém ( $P < 0,05$ ); Posto vs Torre ( $P < 0,05$ ); Sacavém vs Vila Maranhão ( $P < 0,01$ ); Torre vs Vila Maranhão ( $P < 0,01$ ). Outras comparações não foram significativas pelo teste *t* ( $P > 0,05$ ).

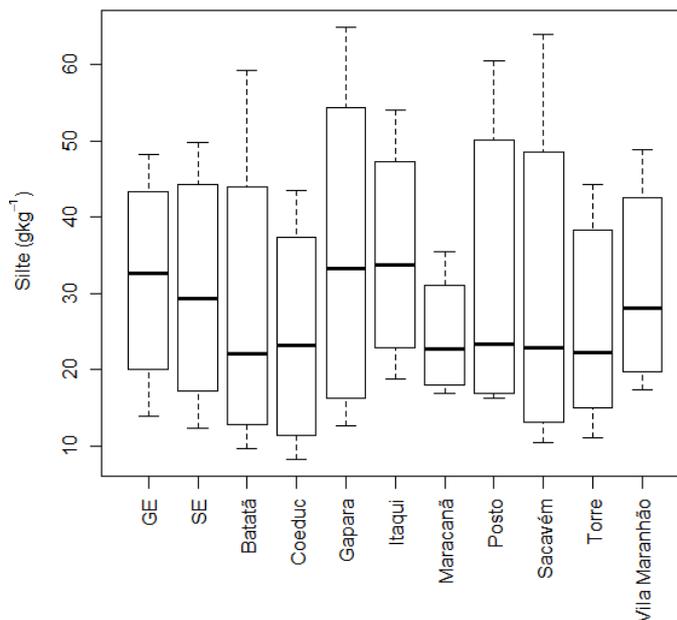


Figura 56 - Conteúdo de silte dos pontos amostrais na estação experimental e nas voçorocas na bacia do rio Bacanga. Autoria: Bezerra, 2011.

O conteúdo de silte nas amostras analisadas, tanto na estação experimental, quanto voçorocas ao longo da bacia do rio Bacanga, não apresentaram diferenças significativas no teste não-paramétrico de Kruskal-Wallis ( $P > 0,05$ ).

A fração areia nas parcelas experimentais e nas voçorocas analisadas apresentou diferenças significativas no teste não-paramétrico de Kruskal-Wallis ( $P < 0,001$ ). As diferenças foram significativas no conteúdo de areia pelo teste de Mann-Whitney nos pontos de amostragem: Geotêxteis com gramíneas vs Batatã ( $P < 0,001$ ); Geotêxteis com gramíneas vs Coeduc ( $P < 0,01$ ); Geotêxteis com gramíneas vs Gapara ( $P < 0,05$ ); Geotêxteis com gramíneas vs Itaqui ( $P < 0,05$ ); Geotêxteis com gramíneas vs Maracanã ( $P < 0,001$ ); Geotêxteis com gramíneas vs Posto ( $P < 0,01$ ); Geotêxteis com gramíneas vs Sacavém ( $P < 0,01$ ); Geotêxteis com gramíneas vs Torre ( $P < 0,01$ ); Geotêxteis com gramíneas vs Vila Maranhão ( $P < 0,01$ ); Solo exposto vs Batatã ( $P < 0,001$ ); Solo exposto vs Coeduc ( $P < 0,05$ ); Solo exposto vs Gapara ( $P < 0,05$ ); Solo exposto vs Itaqui ( $P < 0,05$ ); Solo exposto vs Maracanã

( $P < 0,01$ ); Solo exposto vs Posto ( $P < 0,01$ ); Solo exposto vs Sacavém ( $P < 0,01$ ); Solo exposto vs Torre ( $P < 0,05$ ); Solo exposto vs Vila Maranhão ( $P < 0,01$ ). Outras comparações não foram significativas pelo teste de Mann-Whitney ( $P > 0,05$ ).

Apesar de a fração areia ter pouca representatividade nos resultados da amostragem, ela caracteriza-se por uma maior susceptibilidade à ação dos agentes erosivos, em relação à alta erodibilidade natural e a grande vulnerabilidade das partículas ao transporte.

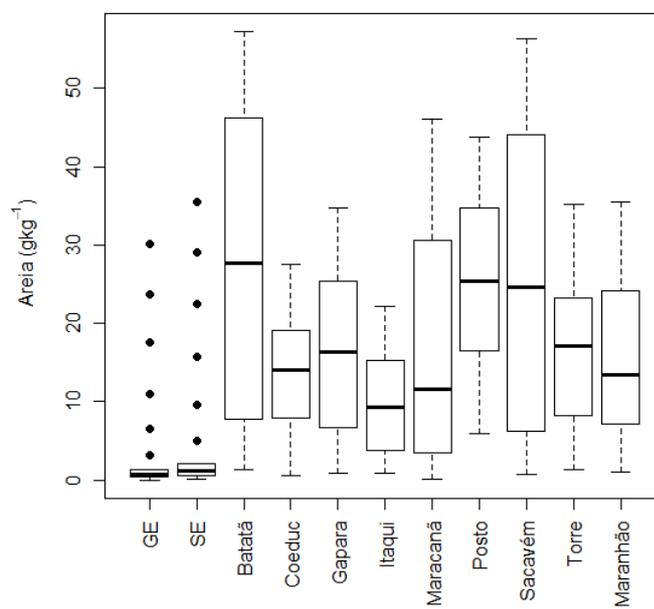


Figura 57 - Conteúdo de areia dos pontos amostrais na estação experimental e nas voçorocas na bacia do rio Bacanga. Autoria: Bezerra, 2011.

Silva e Guerra (2001) pesquisando sobre os teores de argila, silte e areia em 31 amostras de solos nas as sub-bacias do rio Tindiba e do córrego do Catonho, Jacarepaguá, na cidade do Rio de Janeiro, concluíram que:

Nas amostras selecionadas os valores mais elevados de cada fração granulométrica são 52,01% de areia grossa (amostra 7), 16,74% de areia fina (amostra 13), 22,09% de silte (amostra 23) e 32,55% de argila (amostra 23). A segunda classe textural mais representativa é a argilosa (8 amostras), caracterizada por apresentar percentuais de areia no máximo de 45%, de silte no máximo de 40% e de argila entre 40% e 60% (SILVA & GUERRA, 2001).

#### 7.4 Mapeamento geomorfológico

O mapeamento geomorfológico da bacia do rio Bacanga e da região do Golfão Maranhense foi baseado na proposta da União Geomorfológica Internacional apresentada por Rodrigues e Brito (2000), bem como nos mapeamentos realizados no Maranhão por Feitosa (1989, 1996 e 2006), Maranhão (1998), Veiga Júnior (2000) e Soares Junior *et al.* (2008). O Golfão Maranhense é constituído pelas baías de São Marcos e São José, onde os rios Munim, Pindaré, Itapecuru e Mearim desembocam (Feitosa, 2006). As análises valorizaram os estudos das morfoestruturas e morfoesculturas.

Segundo estudos do IBGE (1997), a análise dos condicionantes morfoestruturais no Estado do Maranhão é importante para a compartimentação dos sistemas naturais e também:

Esta compartimentação baseou-se na interrelação dos fatores geológicos e geomorfológicos, considerando-se o arranjo litoestrutural que compreende a orientação e o direcionamento das lineações estruturais dos pacotes rochosos, com a relação dos padrões e hierarquia da drenagem com a litoestrutura, bem como a forma e o posicionamento altimétrico dos modelados e a natureza das formações superficiais. Esta análise permitiu, no Estado do Maranhão, a identificação de três domínios onde os fatos geomorfológicos se organizam de acordo com os aspectos amplos da geologia, como as províncias estruturais, e eventualmente se relacionam à predominância de uma litologia específica como o caso dos depósitos inconsolidados do Quaternário. Os domínios morfoestruturais foram subdivididos em compartimentos definidos pela influência da natureza das litologias, os traços estruturais, a disposição e as feições típicas do modelado e da rede de drenagem (IBGE, 1997).

Nas áreas circunvizinhas do Golfão Maranhense, as principais morfoestruturas mapeadas foram: Bacia de São Luís, Bacia de Barreirinhas, Bacia do Grajaú, Suíte Rosário e Gráben de Ilha Nova. As morfoesculturas identificadas

constam de: Superfície tabular, Colina Dissecada, Depósito Quaternário (Eólico) e Depósito Quaternário (Fluvial e Fluviomarinho).

Apesar de que a Bacia do Parnaíba não foi identificada no mapeamento, faz-se necessário ressaltar suas principais características, tendo em vista sua área de abrangência no Estado do Maranhão. A Bacia Sedimentar do Parnaíba com uma área de 600.000 km<sup>2</sup> ocupa os estados do Maranhão e Piauí, e porções dos estados de Tocantins, Pará e Ceará. Silva *et al.* (2003) considera os seguintes limites dessa unidade morfoestrutural: ao norte pelo Arco Ferrer (Arco São Vicente Ferrer–Urbano Santos–Guamá); a leste pela Falha de Tauá; a sudeste pelo Lineamento Senador Pompeu; a oeste pelo Lineamento Tocantins–Araguaia; e, a noroeste, pelo Arco Tocantins.

De acordo com Santos & Carvalho (2004), a Bacia do Parnaíba foi dividida em quatro unidades menores, baseadas nas diferentes fases de formação: Parnaíba (Siluriano-Triássico), Alpercatas (Jurássico-Eocretáceo), Grajaú (Cretáceo) e o Espigão Mestre (Cretáceo). Neste estudo serão apresentadas apenas as principais características das Bacias do Parnaíba e Grajaú.

Segundo Silva *et al.* (2003), o substrato da Bacia do Parnaíba é caracterizado por:

Maciços arqueanos (Granja e Goiás), crátons sinbrasilianos (São Luís e Núcleo Cratônico Central), cinturões orogênicos brasileiros (Gurupi, Araguaia e terrenos da Província Borborema). Sobre este substrato, implantaram-se estruturas grabeniformes no Mesoproterozóico, Neoproterozóico e no Fanerozóico (Cambro-ordoviciano). Ela foi implantada sobre os riftes cambro-ordovicianos de Jaibaras, Jaguarapi, Cococi/Rio Jucá, São Julião e São Raimundo Nonato sendo, portanto, do tipo IF/IS, compreendendo as superseqüências Siluriana (Grupo Serra Grande), Devoniana (Grupo Canindé) e Carbonífero-Triássica (Grupo Balsas) (SILVA *et al.*, 2003).

A morfoestrutura Bacia do Grajaú (Figura 58) localiza-se ao sul da Bacia de São Luís, sendo separada desta, pelos Arcos Ferrer Rosário Bacaba e Urbana Santos. A Bacia do Grajaú possui preenchimento com sedimentos da Superseqüência Cretácea, que compreende as formações Codó, Grajaú e da Formação Itapecuru (SILVA *et al.*, 2003).

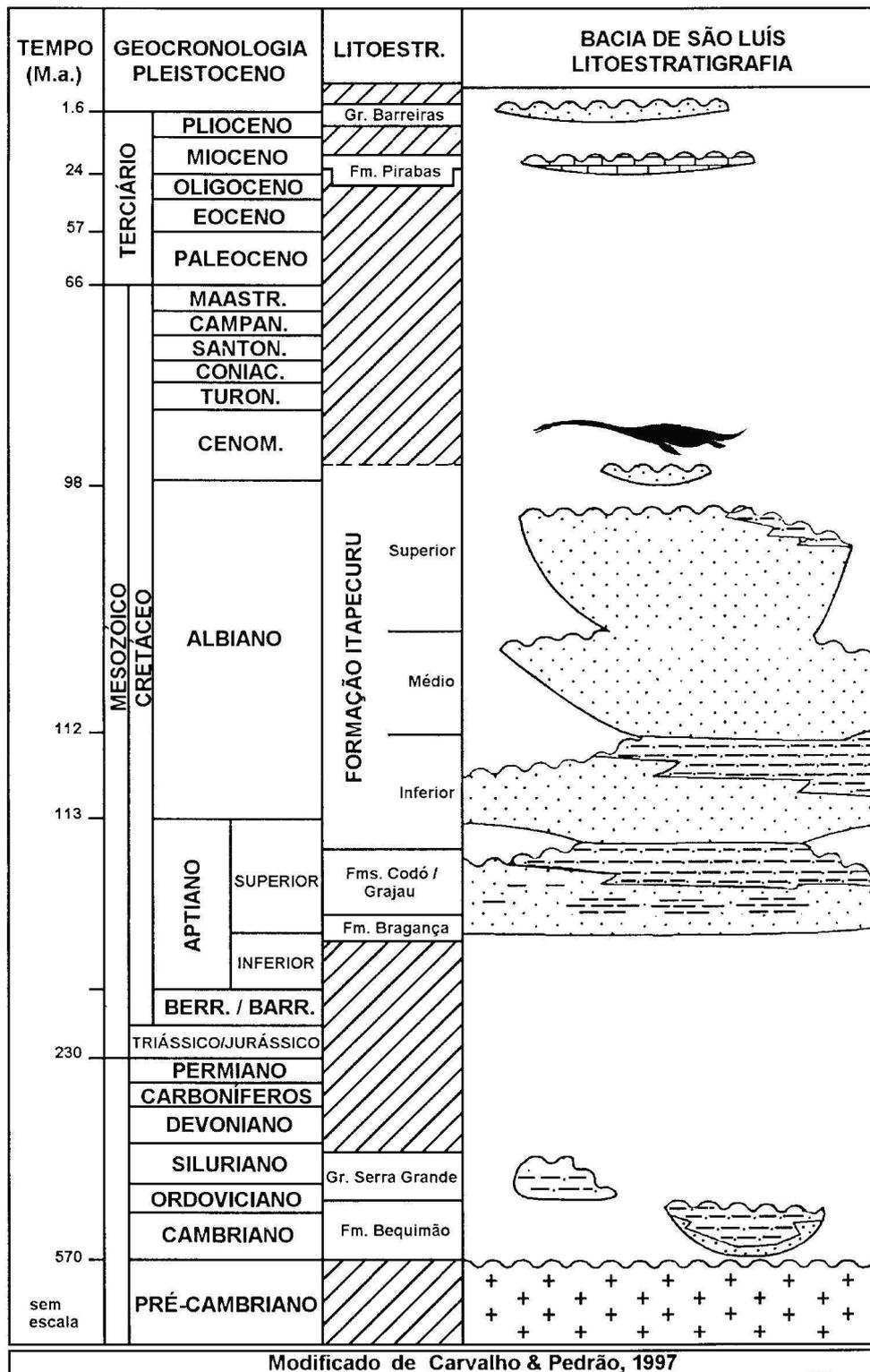
A deposição da Formação Codó iniciou-se no Neo-Aptiano, localiza-se na porção leste e sul da Bacia de Grajaú, sendo caracterizadas por depósitos de origem lacustre e *sabkha-salt pan*, formados por evaporito, folhelho negro betuminoso, folhelho cinza-esverdeado e calcário organizados em ciclos de arrasamento ascendente (GONÇALVES *et al.*, 2006). A Formação Grajaú apresenta arenitos com intercalações de argilitos vermelhos, caracterizando um ambiente ambientes flúvio-deltaicos e eólicos (SOARES JUNIOR *et al.*, 2008).

A Formação Itapecuru foi elevada a Grupo por Rossetti & Truckenbrodt (1997), sendo subdividida em três unidades: Unidade Indiferenciada, Formação Alcântara e Formação Cujupe. Nesta pesquisa, foram empregados os termos Formações Itapecuru e Barreiras, por ser utilizado em ampla bibliografia sobre a área de estudo (FEITOSA, 1989, 1996, 2006; MARANHÃO, 1998). A Formação Itapecuru caracteriza-se pela presença de arenitos médios-finos, carbonáticos, de coloração avermelhada, com intercalações de siltitos, argilitos e folhelhos vermelhos e esverdeados, distribuídos ao longo do Rio Itapecuru, nas proximidades da cidade de Itapecurú-Mirim, Maranhão (SOUSA, 2006).

Idade		Estratigrafia	
CENOZÓICO		Sedim. Pós-Barreiras Fm. Pirabas/Barreiras	
	Neocretáceo	S1	Formação Cujupe
CRETÁCEO	Albiano		Grupo Itapecuru
		Meso	
	Eo	S2	
Neoplioceno	S3	Formações Codó/Grajaú	

Figura 58 - Síntese da estratigrafia da Bacia de Grajaú. Fonte: Gonçalves *et al.*, 2006.

A morfoestrutura Bacia de São Luís (Figura 59) situa-se ao norte da Bacia do Grajaú, possui uma área de 18.000 km<sup>2</sup> e uma espessura total de aproximadamente 4.500 m, caracterizando-se por rochas paleozóicas, mesozóicas e cenozóicas. A referida bacia é do tipo *rift*, e formada por estruturas alongadas no sentido noroeste-sudeste, cuja origem está vinculada ao estiramento litosférico relacionado com a abertura do Oceano Atlântico Equatorial, iniciado no Eocretáceo. Sua história deposicional pré-Cretácea tem relação direta com os depósitos da Bacia do Grajaú, área com a qual possuía continuidade física durante o Paleozóico (ROSSETTI, 2006; CARVALHO, 2000).



- PLESIOSAURIA
- CARBONATO
- FOLHELHO E ARGILITO
- SILTITO
- ARENITO
- ROCHAS MAGMÁTICAS E METAMÓRFICAS

Figura 59 - Síntese da litoestratigrafia da Bacia de São Luís. Fonte: Modificado de Carvalho & Pedrão (1997) in Carvalho (2000).

A morfoestrutura Bacia de Barreirinhas (Figura 60) tem origem no Cretáceo e está localizada na Margem Atlântica Equatorial Brasileira, corresponde a um gráben alongado de direção aproximada E-W, é formada por um segmento terrestre e outro submerso, separados pelo Alto Queimadas-Arpoador (MACAMBIRA & CORRÊA, 2007). Em relação aos limites da bacia é limitada ao norte pelo Oceano Atlântico; ao sul, por uma série de falhamentos normais e pelos Arcos Ferrer Rosário Bacaba e Urbano Santos; a leste, pela fossa do Piauí e a plataforma de Parnaíba e a oeste pelo graben de Ilha Nova (VEIGA JÚNIOR, 2000).

De acordo com Soares Junior *et al.* (2008) o preenchimento da Bacia de Barreirinhas é caracterizado por:

Duas seqüências estratigráficas: de rifle, do Eoalbio, formado pelo Grupo Canárias, e de margem passiva, representada pelos Grupos Caju, Humberto de Campos, Formação Pirabas e Formação Barreiras. O Grupo Canárias é caracterizado por folhelhos escuros (Formações Arpoador e Tutóia), arenitos grosseiros cinzentos (Formação Bom Gosto) e arenitos médios cinzentos (Formação Barro Duro), caracterizando depósitos de leques deltáicos em ambiente marinho. O Grupo Caju é composto pelas Formações Bonfim, Preguiças e Peria. As duas primeiras são de ambiente nerítico de alta e baixa energia e são formadas por calcarenitos biocásticos e oncolíticos e calcilitos, respectivamente. A Formação Peria é composta de folhelhos com calcarenitos subordinados depositados em ambiente marinho raso. O Grupo Humberto de Campos é formado pelas formações Areinhas, Ilha de Santana e travosas que se interdigitam lateralmente e formam um pacote depositado por um único sistema em ambientes marinho nerítico, batial e abissal (SOARES JUNIOR *et al.*, 2008)

As Formações Pirabas (Oligo-Miocênica) e Barreiras (Mioceno-Pliocênica) estão expostas no litoral do Maranhão, sendo caracterizados por uma variedade de fácies carbonáticas a siliciclásticas, com gênese em ambiente variando entre marinho transicional a plataformal. A Formação Pirabas é constituída predominantemente por rochas carbonáticas, tendo várias ocorrências fossilífera. A Formação Barreiras caracteriza-se por rochas sedimentares que variam desde argilitos a conglomerados, sendo pouco ou mal selecionados (ROSSETTI, 2006).



A morfoestrutura Gráben de Ilha Nova possui forma assimétrica e está separado da Bacia de São Luís por um alto do embasamento. O processo de rifteamento desenvolveu falhas normais e propiciou a deposição de espessas seqüências sedimentares (VEIGA JUNIOR, 2000). A Bacia de Ilha Nova situa-se entre as bacias de São Luís e Barreirinhas. O preenchimento sedimentar é constituído por unidades litoestratigráficas do Cretáceo (Formações Bragança, Grajaú, Codó, Itapecuru e Grupo Canárias), e do Neogeno, (Formação Pirabas, Formação Barreiras e Formação Pós-Barreiras) (SOARES JUNIOR *et al.*, 2008).

A morfoestrutura Suite Rosário de idade Paleoproterozóica possui aproximadamente 400 km<sup>2</sup>, sendo caracterizada por um conjunto de múltiplos plutons tonalíticos, granodioríticos e graníticos, cálcio-alcálinos. Petrograficamente é constituída por rochas plutônicas de granulação grossa com textura original granular hipidiomórfica parcialmente preservada. Elas encontram-se afetadas por zonas de cisalhamento que imprimiram um metamorfismo em condições da fácies xisto verde (GORAYEB *et al.*, 2009).

Quanto aos arqueamentos, na área de estudo foram identificados o Arco Ferrer Rosário Bacaba e Arco Urbano Santos. De acordo com Veiga Junior (2000), esses dois arcos são altos do embasamento muito bem definidos por anomalias gravimétricas positivas e fortes alinhamentos magnéticos. Eles evoluíram no Mesozóico e tiveram forte influência nos processos tectônicos e sedimentares da margem continental.

Baseando-se nas morfoestruturas foram mapeadas as seguintes morfoesculturas: 1. Bacia de São Luís (Superfície tabular, colina dissecada, depósito quaternário eólico, Depósito quaternário fluvial e flúvio-marinho); 2. Bacia de Barreirinhas (Depósito quaternário fluvial e fluviomarinho, depósito quaternário

eólico); 3. Bacia do Grajaú (Superfície tabular Colina dissecada, depósito quaternário eólico, depósito quaternário fluvial e fluviomarinho); 4. Gráben da Ilha Nova (depósito quaternário eólico, depósito quaternário fluvial e fluviomarinho); e 5. Suíte Granitóide (Suíte Rosário) (Figura 61).

A superfície tabular corresponde às superfícies com topos planos com altitude chegando até 100 m na área mapeada. Estudando esta unidade geoambiental, Feitosa (2006), considerou que:

Alguns compartimentos desta unidade geoambiental encontram-se junto ao litoral com bordas abruptas que formam as barreiras terciárias conhecidas como falésias. Processos erosivos subatuais modelaram formas erosivas que restam como páleofalésias em zonas recuadas em relação à linha de costa atual (FEITOSA, 2006).

Abaixo desse patamar estão às colinas dissecadas com baixa, média, alta declividade, submetidas à modelagem dos rios. Nessa unidade da paisagem, quando retirada a cobertura vegetal somada às chuvas concentradas e a alta erodibilidade dos solos, está sujeita aos processos erosivos acelerados. As planícies fluviais, na planície litorânea é caracterizada por aluviões marinhos e fluviomarinhos, enquanto que na planície costeira é formada por aluviões fluviais com influência eólica, na costa de dunas e restingas, e com influência lacustre na Baixada Maranhense (Feitosa, 2006).

As planícies fluviomarinhas correspondem à ambiente transicional fluvial e marinho, preenchidas por manguezais, sendo caracterizadas com áreas planas com altimetria que não ultrapassam os 10 m na área mapeada, resultantes da acumulação fluviomarinha. Essas áreas acham-se muito recortadas por canais, formando ilhas, constituídas por sedimentos quaternários inconsolidados (IBGE, 1997).

Os depósitos quaternários eólicos estão dispostos principalmente na Bacia de Barreirinhas e parte oriental da Bacia de São Luís, sendo resultantes da ação dos agentes oceanográficos na planície costeira, originando campos de dunas móveis, dunas fixas, paleodunas, restingas e falésias. Sobre os depósitos quaternários eólicos IBGE (1997), fez uma caracterização dessa unidade geoambiental:

Caracteriza-se por uma área plana com altitudes em torno de 0 a 40m, formada por depósitos eólicos e marinhos quaternários, com a presença de dunas de diferentes gerações e de lagoas. A área de dunas mais significativa ocorre nas proximidades do litoral e é conhecida como Lençóis Maranhenses. São dunas móveis com formas diferenciadas, em barcanas, crescentes e parábolas entre outras, sem colonização vegetal. É comum entre elas, a ocorrência de lagoas de águas escuras resultantes do afloramento do lençol freático; algumas dessas lagoas são temporárias, desaparecendo durante o período seco (IBGE, 1997).

Investigando sobre as características dos depósitos eólicos Feitosa (2006)

afirmou que:

A costa de dunas e restingas é constituída de formações superficiais exclusivamente arenosas com ausência de cobertura vegetal ou com cobertura vegetal parcial conformando dunas móveis e fixas intercaladas por lagoas de origem pluvial, contendo água doce. A zona sem cobertura vegetal corresponde à área do Parque Nacional dos Lençóis Maranhenses, delimitado a oeste pelo Golfo do Maranhão e a leste pelo rio Preguiças. É dominado por dunas móveis que avançam continuamente sobre a vegetação do Cerrado, em direção ao continente, tendo alcançado grande distância do litoral. Nessa área, formam-se dunas de vários tipos e tamanhos, sendo mais comuns as do tipo Barcana, que podem medir até 30 metros de altura da crista à base, justificando a denominação de grandes lençóis (FEITOSA, 2006).

O Suíte Rosário caracteriza-se pelo afloramento de rochas magmáticas remanescentes do arqueamento Ferrer-Urbano Santos, estando disposto na direção geral leste-oeste, com forte presença no leito do rio Itapecuru a jusante da cidade de Rosário, onde aflora em grandes blocos de rochas (MARANHÃO, 1998).



A bacia do rio Bacanga insere-se na morfoestrutura da Bacia de São Luís, sendo a sua geomorfologia resultante das forças de origem climática e oceanográfica, bem como a ação antrópica. Entretanto, a hidrodinâmica fluvial, representada pelos afluentes do rio Bacanga, é o principal agente responsável pelos processos de erosão, transporte e deposição de sedimentos, que influenciam a esculturação do relevo, dando origem ao modelado característico da área. As principais feições geomorfológicas identificadas na área da bacia do rio Bacanga foram: Superfície tabular, colina dissecada, planície fluvial e planície fluviomarinha (Tabela 12).

Tabela 12 – Feições geomorfológicas e respectivas representatividades espaciais.

<b>Feições Geomorfológicas</b>	<b>Área ocupada</b>	
	<b>%</b>	<b>Km<sup>2</sup></b>
Planície fluviomarinha	7	8,35
Planície fluvial	10	16,42
Colina dissecada	52	59,06
Superfície tabular	31	11,40
<b>TOTAL</b>	<b>100</b>	<b>95,24</b>

Autoria: Bezerra, 2011.

Os tabuleiros representam as superfícies mais elevadas da bacia, estão dispostos principalmente na porção leste, possuindo superfícies aplainadas esculpidas nas formações Barreiras e Itapecuru. Os tabuleiros estão bastante desgastados por processos denudacionais, representando altitudes que não ultrapassam os 58 m, estando relativamente protegidos na área do Parque Estadual do Bacanga. Essas características demonstram a intensidade dos agentes

morfogenéticos nas áreas próximas ao litoral, principalmente as correntes marinhas, marés, ação eólica, no período de estiagem, e a hidrodinâmica pluvial e fluvial, no período chuvoso.

A dinâmica dos processos geomorfológicos desencadeou significativos desgastes dos tabuleiros, dando origem a formas subtabulares residuais, intercaladas por colinas dissecadas. Os tabuleiros abrigam os mananciais mais importantes, não só da bacia em estudo, mas de toda a Ilha do Maranhão, constituindo uma superfície tabular central, que apresenta as maiores altitudes na Ilha (65 m), sendo o local das nascentes dos principais rios, como Anil, Paciência, Santo Antônio e Tibiri.

Logo abaixo das superfícies tabulares e subtabulares, estão as colinas dissecadas com vertentes modeladas nas Formações Itapecuru e Barreiras. As vertentes possuem declividades suaves, variando entre 0 a 20 %, tornando-se muitas vezes, difícil a sua identificação, decorrente do avançado processo de denudação. Em alguns trechos apresenta maior declividade, estando acima dos 20%.

As vertentes apresentam extensão, declividade e formas variadas, encontrando-se desde formas suaves, extensas, até pequenas extensões com declives abruptos intercalando segmentos côncavos, convexos e planos. Em alguns trechos, a vegetação das encostas foi destruída pela ocupação desordenada, deixando essa feição exposta à ação dos agentes geomórficos que culminou com o aparecimento de processos erosivos em diferentes estágios (ravinas e voçorocas) (Figuras 62, 63).



Figura 62 – Ravinamentos na voçoroca do Maracanã. Foto: Bezerra, 2009.



Figura 63 – Ravinamentos nas proximidades da voçoroca do Posto. Foto: Bezerra, 2009.

A partir do perfil topográfico, podem-se visualizar as diferentes feições geomorfológicas, iniciando-se dos tabuleiros até atingir a planície fluviomarinha (Figura 64).

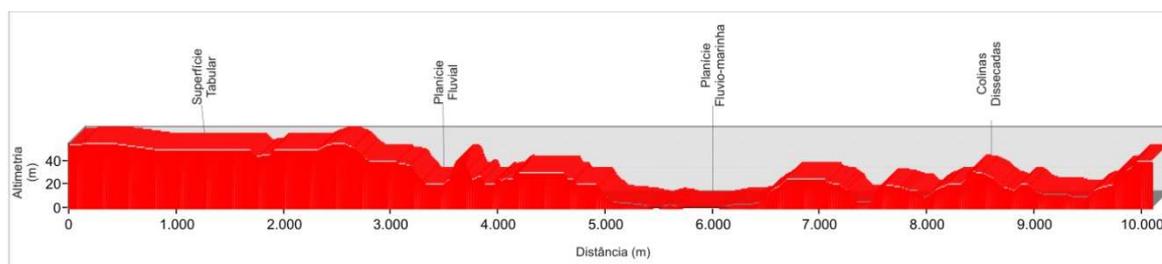


Figura 64 – Perfil topográfico transversal da bacia do rio Bacanga. Autoria: Bezerra, 2011.

A planície fluviomarinha, ocupada por áreas de manguezal, está submetida aos efeitos dos agentes oceanográficos, como correntes e marés. O manguezal é uma vegetação de grande poder de regeneração, sendo considerado patrimônio biológico e cultural, em que se sobressai à alta produtividade pesqueira. Os manguezais estão relativamente conservados em alguns pontos da bacia do rio Bacanga, embora, nos últimos anos, a devastação venha se intensificando através do processo de ocupação acelerada e do corte para uso como lenha na indústria de panificação e esteio na indústria de construção civil, que acarreta uma série de problemas sanitários e comprometem a manutenção e a qualidade da fauna e flora do ambiente (Figura 65).

As planícies fluviomarinhas são formadas por depósitos de sedimentos em que predominam argila e silte, com ocorrência de areia fina a muito fina. Constitui um ambiente Quaternário, com granulometria variada conforme a quantidade de energia das correntes e marés, possuindo um aspecto lamoso e de coloração escura (Figura 65).

A planície fluvial é constituída por depósitos provenientes da sedimentação fluvial, cujo poder de deposição depende da competência dos rios em seu baixo curso. As planícies correspondem a áreas essencialmente planas ou levemente inclinadas, contendo principalmente matéria orgânica e sedimentos com granulometria arenosa, areno-argilosa e siltico-argilosa. Essas feições geomorfológicas são faixas rebaixadas, sujeitas a inundações periódicas pelo rio Bacanga e seus afluentes durante o período chuvoso, e pela maré semidiurna próxima a desembocadura (Figura 65).

Nas áreas mais elevadas, a esculturação do relevo da bacia em estudo é decorrente do trabalho dos rios sob uma litologia extremamente friável, evidenciando-se suas atividades através da produção e da distribuição de sedimentos ao longo dos cursos d'água, principalmente nas estações chuvosas quando as descargas líquidas e sólidas atingem níveis máximos (Figura 65).

Em se tratando das voçorocas do Sacavém, Coeduc, Torre, Batatã, Itaqui, Gapara, Posto, Vila Maranhão e Maracanã, estas estão localizadas em áreas com declividades acima de 5%, conforme o mapa de declividade (Figura 66). Quando aos aspectos geomorfológicos, as voçorocas Torre e Batatã estão situadas nas bordas dos tabuleiros, enquanto as outras feições erosivas estão localizadas nos topos das colinas dissecadas convergindo em direção aos canais de drenagem.

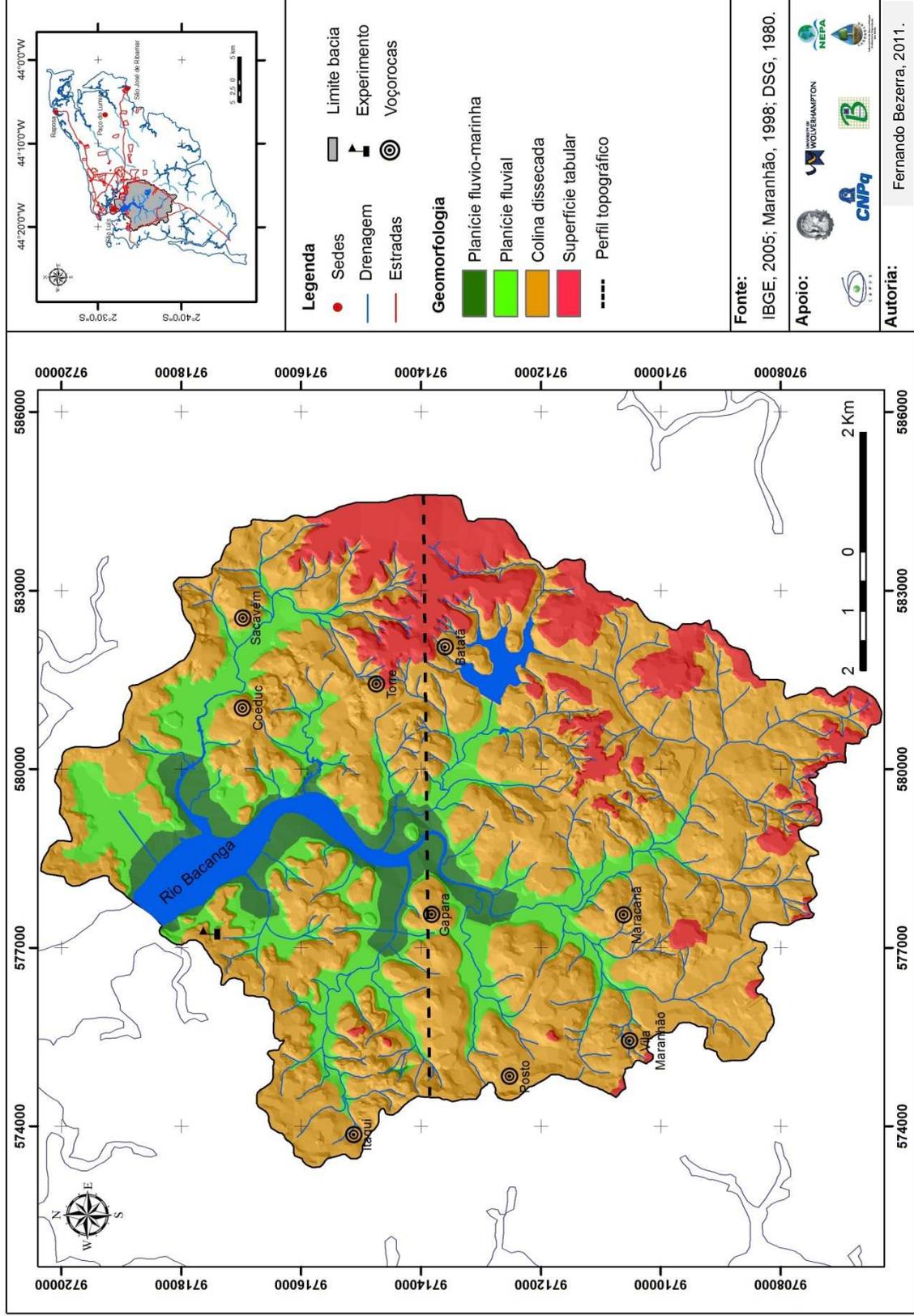


Figura 65 – Mapa de geomorfologia da bacia do rio Bacanga.

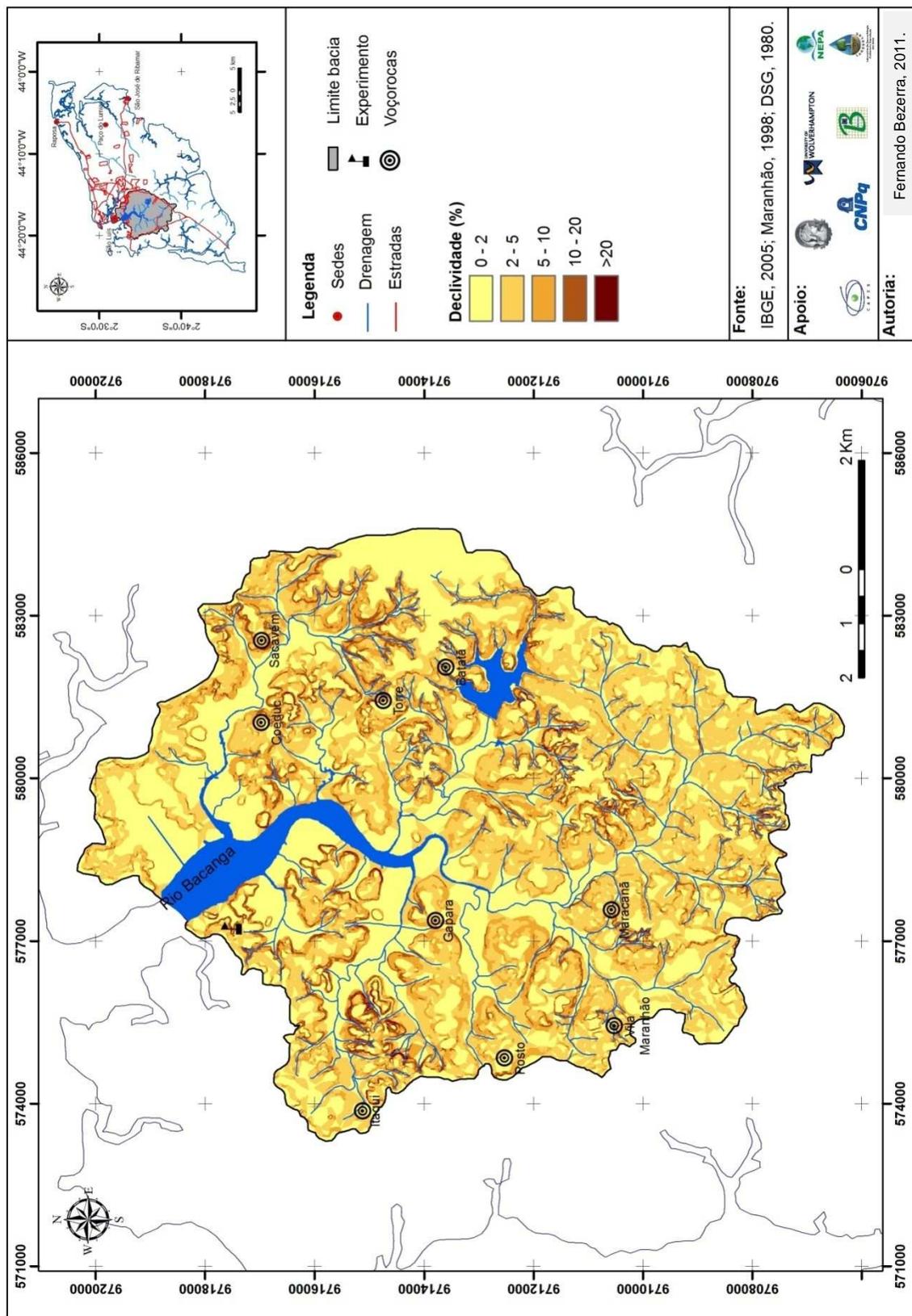


Figura 66 – Mapa de declividade da bacia do rio Bacanga.

## 7.5 Fragilidade ambiental na bacia do rio Bacanga

O cruzamento das informações, referentes ao uso da terra, pedologia, índices pluviométricos, declividade, e com base na experiência na área de estudo, resultaram no mapa de fragilidade ambiental da bacia do rio Bacanga, na qual foi possível identificar as fragilidades muito baixa ou nula, baixa, média, forte e muito forte. Com o mapeamento dessas áreas tem-se a indicação das áreas potencialmente mais frágeis da paisagem, no que se referem ao início e desenvolvimento de feições erosivas aceleradas, sendo fundamentais para o planejamento ambiental-territorial.

Baseando-se nos dados das estações pluviométricas das séries históricas da SUDENE (Superintendência de Desenvolvimento do Nordeste) e do DNAE (Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica) no período de 1971 a 1998, 2003 a 2008, referentes às estações de São Luís, São José de Ribamar e Bacabeira, foram definidas três intervalos pluviométricos: 2.097 a 2.127 mm; 2.128 a 2.149 mm; e 2.150 a 2.170 mm (Tabela 13). Apesar da pequena diferença entre os intervalos e não significativa área da bacia (95,24 km<sup>2</sup>), esses índices podem influenciar a aceleração dos processos morfogenéticos e a formação de feições erosivas em diferentes setores da bacia.

A precipitação concentrada em seis meses durante o ano na região foi considerada como importante preso na composição do mapa de fragilidade. O período de estiagem, ou chuvas escassas, inicia-se em meados de julho, finalizando em dezembro, caracterizando-se por forte insolação e elevadas taxas de evaporação, peculiar às regiões próximas a linha do Equador.

A estiagem concentrada em seis meses contribui para deixar a superfície do solo mais seca e exposta à ação dos agentes externos, principalmente à ação eólica. No período chuvoso, o transporte e deposição dos sedimentos são maximizados, devido às características atmosféricas aqui mencionadas, formando diferentes feições erosivas nas áreas com alta e média fragilidade. As fortes chuvas somadas com a uma litologia predominantemente sedimentar podem ocasionar o aparecimento de processos erosivos acelerados.

Tabela 13 – Fragilidade ambiental associada aos índices pluviométricos.

<b>Intervalo de chuvas (mm)</b>	<b>Fragilidade</b>
2.097 – 2.127	Média
2.128 - 2.149	Forte
2.150 – 2.179	Muito forte

Autoria: Bezerra, 2011.

A categoria com maior importância na elaboração do mapa de fragilidade ambiental foi de uso da terra obtida a partir das imagens CBERS (Satélite Sino-Brasileiro de Recursos Terrestres). Não foram encontradas fotografias aéreas ou imagens de satélites com escala de detalhe que abrangessem completamente a bacia do rio Bacanga. As categorias de uso da terra identificadas constaram de cobertura arbórea, gramíneas e área construída (Tabela 14).

A categoria cobertura arbórea caracteriza-se pela floresta secundária mista, oriunda da devastação da cobertura vegetal original, estando dispostas principalmente nos topos dos tabuleiros do Parque Estadual do Bacanga, sendo caracterizadas por palmáceas e arbustos, apresentando baixa ou nula fragilidade ambiental. Abaixo dessas coberturas, está à categoria de uso gramíneas, oriundas do processo de devastação recente, não tendo tempo suficiente para completar o

processo de sucessão ecológica, devido também ao tipo de uso que é submetido, geralmente, o pastoreio, o que vem ser um fator agravante para o início de desenvolvimento de processos erosivos. Essa categoria foi classificada como forte fragilidade ambiental. As áreas construídas caracterizam-se pelas zonas impermeabilizadas com formação do rápido escoamento superficial, sendo classificada como baixa fragilidade, apesar de que nas áreas circunvizinhas com cobertura de gramínea e alta erodibilidade, o fluxo superficial concentrado possa gerar impactos negativos (Tabela 14).

Tabela 14 – Fragilidade dos usos e coberturas na bacia do rio Bacanga.

<b>Uso da terra / cobertura vegetal</b>	<b>Fragilidade</b>
Cobertura arbórea	Muito baixa ou nula
Área construída	Baixa
Gramíneas	Forte

Autoria: Bezerra, 2011.

A erodibilidade dos solos constitui um importante parâmetro na produção dos mapas de fragilidade ambiental, e tendo em vista que os solos da Ilha do Maranhão, originários das Formações Barreiras e Itapecuru, são altamente friáveis e inconsolidados, tendo forte fragilidade quando a cobertura vegetal é retirada, e ficam expostos aos agentes externos, principalmente no período com chuvas concentradas. A partir dos estudos de Maranhão (1998), a bacia do rio Bacanga apresenta as seguintes classes de solos (adaptados para a nova classificação da EMBRAPA, 1999): Argissolos Vermelho-Amarelos com lateritas, Argissolos Vermelho-Amarelos, Neossolos Regolíticos, Gleissolos e Neossolos Quartzarênicos (Tabela 15).

Os Argissolos Vermelho-Amarelos são encontrados principalmente no setor leste da bacia em estudo, sendo solos profundos e moderadamente profundos, geralmente bem drenados e porosos, apresentando atividade da argila baixa, horizonte B textural imediatamente abaixo do horizonte A. Os Argissolos Vermelho-Amarelos com lateritas na porção oeste da bacia possuem também essas características, mas com a presença da lateritas variando entre os horizontes A e B, sendo um controle estrutural para o desenvolvimento dos processos erosivos. Os graus de fragilidade atribuídos para essas classes de solos foram muito forte e forte respectivamente (Tabela 15).

Os Neossolos Regolíticos caracterizados como solos poucos desenvolvidos, profundos, ácidos, permeáveis, muito bem drenados e com fertilidade natural muito baixa oriundos das Formações Barreiras e Itapecuru, apresentam fragilidade muito forte. Os Gleissolos formam-se sob a forte ação do lençol freático, encontrando-se na porção centro-sul da bacia do Bacanga, acompanhando o canal principal, foi considerado com média fragilidade. Os Neossolos Quartzarênicos estão dispostos na planície de maré, preenchidas pelos manguezais, sendo constituídos por argilas, apresentam muito baixa ou nula fragilidade ambiental, em relação ao início e desenvolvimento dos processos erosivos (Tabela 15).

Tabela 15 – Classes de fragilidade dos solos com atual classificação da EMBRAPA (1999) da bacia do rio Bacanga. Fonte: Maranhão, 1998.

<b>Classificação dos solos</b>	<b>Fragilidade</b>
Neossolos Quartzarênicos (manguezal)	Muito baixa ou nula
Gleissolos	Média
Argissolos Vermelho-Amarelos (laterita)	Forte
Argissolos Vermelho-Amarelos Neossolos Regolíticos	Muito forte

Os intervalos de declividades adotadas no estudo foram atribuídos menores pesos, quando comparadas com as demais categorias, uma vez que há o predomínio de formas tabulares e subtabulares de caráter residual com declives suaves, espaçadas por colinas dissecadas. As áreas com maiores declividades encontram-se nas bordas dos tabuleiros, não sendo representativas espacialmente. Os intervalos de declividades em % utilizadas na pesquisa com respectivas classes de fragilidade ambiental podem ser visualizados na tabela 16.

Tabela 16 - Intervalos de declividade com respectivas fragilidades ambientais na bacia do rio Bacanga.

Declividade (%)	Fragilidade
0 - 2	Muito baixa ou nula
2 - 5	Baixa
5 - 10	Média
10 - 20	Forte
> 20	Muito forte

Autoria: Bezerra, 2011.

As chuvas concentradas, as classes de solos e a declividade influenciam o início e desenvolvimento dos voçorocamentos na bacia do rio Bacanga, mas são potencializadas pelo manejo inadequado do solo, principalmente o desmatamento. Por isso é importante considerar as limitações, quanto a uso da terra na bacia em questão.

Sobre o levantamento do uso da terra, Koffler (1993) considerou que:

O levantamento do uso da terra de uma região é fundamental para o planejamento do seu desenvolvimento, na medida em que as conseqüências do uso e da ocupação desordenados causam desequilíbrio do ambiente. Os processos de erosão acelerada, as inundações cada vez mais freqüentes e o assoreamento de cursos

d'água e reservatórios, são conseqüências do uso indevido das terras (KOFFLER, 1993).

De acordo com Mota (1999)

O disciplinamento do uso e ocupação tem grande importância na drenagem das águas de uma bacia. Áreas que têm a maior relação com os recursos hídricos devem ter ocupação controlada e, em alguns casos, evitada, de forma que sejam garantidos a infiltração e o escoamento das águas, de modo que não sejam causados danos ao ambiente. Entre essas áreas, citam-se: planícies de inundações, locais de amortecimento de cheias, talvegues, encostas e áreas verdes (MOTA, 1999).

A aceleração dos processos morfogenéticos na área da bacia do rio Bacanga está relacionada à expansão urbana e industrial, sem planejamento e com caráter especulativo, pois a pequena amplitude altimétrica e a baixa declividade das unidades geomorfológicas não oferecem limitações para o uso e ocupação do solo.

De um modo geral, nos tabuleiros e colinas, não se identificam limitações de uso antrópico, exceto nas nascentes, praticamente destruídas na área, com exceção de algumas nascentes no Parque Estadual do Bacanga, que constituem áreas de preservação permanente, presentes nas superfícies mais elevadas, cuja proteção está prevista no Código Florestal (Lei no 4.771, de 15 de setembro de 1965) e suas medidas provisórias.

Outra limitação de uso identificada nas áreas dos tabuleiros, colinas e vertentes é à extração de lateritas, terra preta (horizonte A), e silte e argila, cujo material é usado na indústria de construção civil, e como adubo no cultivo em geral. As planícies fluviais e flúvio-marinhas possuem uma série de limitações de uso e ocupação do solo, de acordo com a legislação ambiental vigente, todas relacionadas com a retirada da vegetação que protegem as margens do rio e das áreas próximas a desembocadura com influência fluviomarinha.

A mata ciliar está disposta nas margens no alto curso rio Bacanga, estando relativamente conservada no Parque Estadual do Bacanga, mas com fortes pressões populacionais dos bairros circunvizinhos. Caracteriza-se por regiões mais rebaixadas da bacia. Na margem esquerda, encontra-se fortemente devastada o que impõe uma série de restrições para a ocupação de toda a planície fluvial. De acordo com o Código Florestal e a Lei nº 7.803 de 18 de julho de 1989, as matas galerias e outras formas de vegetação que protegem as margens dos rios ou de qualquer curso d'água são consideradas de preservação permanente desde o seu nível mais alto até a desembocadura, cuja faixa de proteção depende da largura do canal.

Considerando o processo de desmatamento, Mota (1999) afirmou que:

A ocupação de um ambiente natural, no processo de urbanização, geralmente ocorre com a remoção da cobertura vegetal. O desmatamento, quando feito de forma inadequada, resulta em vários impactos ambientais, tais como: modificações climáticas; danos à flora e fauna; descobrimento do solo, causando o incremento da erosão; remoção da camada fértil do solo, empobrecendo-o; assoreamento dos recursos hídricos; aumento do escoamento superficial da água e redução da infiltração; inundações (MOTA, 1999).

Apesar do processo de devastação e a poluição na foz do rio Bacanga, os manguezais remanescentes precisam de um disciplinamento quanto ao seu uso, principalmente aos solos que possuem alto teor de salinidade e que impedem o uso agrícola, sendo mais indicado para o extrativismo de moluscos e crustáceos. O manguezal constitui reserva ecológica segundo o Código Florestal e a Resolução nº 04/86, do conselho Nacional do Meio Ambiente, por abrigar inúmeras espécies da fauna aquática e terrestre e funcionar como estabilizadores dos sedimentos costeiros, desempenhando o papel de exportador de matéria orgânica para o estuário.

As planícies flúvio-marinhas ocupam uma posição de destaque por serem áreas de fixação de crustáceos e moluscos, como camarões, caranguejos e sururus, embora atualmente estejam em acelerado processo de degradação ambiental devido à ação antrópica. Esse ambiente constitui uma importante fonte de subsistência para as populações ribeirinhas, embora nos últimos anos bastante exploradas para o comércio de toda a ilha.

A partir da sobreposição das variáveis índices pluviométricos, uso da terra, pedologia e declividade, chegou-se ao mapa de fragilidade ambiental em relação aos processos erosivos na bacia do rio Bacanga (Figura 67). Conforme observado no mapa, a fragilidade média representa 41 % da área total da bacia, seguida das fragilidades forte (23,8%) e Baixa (22,6%). As áreas de menores representatividades espaciais na área de estudo, são as fragilidades muito forte e muito baixa ou nula, que chegaram a 10,1% e 2,5 % respectivamente.

Novaes *et al.* (2007) analisando a sensibilidade ambiental da parte ocidental da Ilha do Maranhão, concluíram que:

A área em estudo esta compreendida de acordo com o ESI – Índice de sensibilidade ambiental basicamente entre duas sensibilidades ambientais, a de índice 2 (menos sensível - Tabuleiro) e a de índice 10 (mais sensível – Mangues, Apicuns, Planície Flúvio-Marinha), logo se observa a maior vulnerabilidade e menor sustentabilidade da zona costeira da área que compreende a sensibilidade 10. Esta análise de Cartas de Sensibilidade é de grande importância ambiental, pois permite identificar e mapear as localizações de recursos sensíveis antes que ocorra um acidente, de modo que as prioridades de proteção possam ser estabelecidas e as estratégias de contenção e limpeza / remoção delineadas antecipadamente (Novaes *et al.*, 2007).

Neste estudo, o mapeamento das áreas de fragilidade ambiental foi direcionado para as zonas da bacia do rio Bacanga, com potencial para o início e desenvolvimento de processos erosivos acelerados.

Todo esse processo de voçorocamento inicia-se com o inadequado manejo do solo, que resulta na retirada da cobertura vegetal original, deixando o solo exposto a ação dos agentes intempéricos, principalmente as chuvas concentradas nos meses de janeiro a junho. Os solos são altamente friáveis e mal consolidados conforme já descrito, não oferecem nenhuma resistência a ação das gotas de chuvas, que selam a superfície do solo, composta principalmente, segundo os resultados, pela fração franco-siltosa, tendendo a formação de encrostamento e diminuição da taxa de infiltração e rápida formação do escoamento superficial.

Apesar de que apenas 23% da área da bacia corresponder a fragilidade ambiental forte, todas as voçorocas selecionadas nesse estudo (Sacavém, Coeduc, Torre, Batatã, Itaqui, Gapara, Posto, Vila Maranhão e Maracanã) estão localizadas nesta categoria. As fragilidades forte e muito forte estão dispostas principalmente na porção Sul - Oeste da bacia, caracterizando-se pelo baixo processo de urbanização. As voçorocas situadas nessa área, como Maracanã, Vila Maranhão, Itaqui tem sua origem ligadas a construção da BR 135, com exceção da voçoroca do Gapara que tem sua origem relacionada à extração de silte e argila para construção civil. Por outro lado, as áreas fortemente urbanizadas na porção nordeste da bacia estão as voçorocas Coeduc e Sacavém, que surgiram devido ao processo de ocupação irregular, à concentração da drenagem urbana e a extração mineral.

O Parque Estadual do Bacanga caracterizado pela presença da floresta secundária mista e localizado na porção leste da bacia também apresentou a fragilidade forte. Nesse parque foram identificadas as voçorocas Torre e Batatã, cujas origens estão ligadas a construção das linhas de transmissão da ELETRONORTE (Centrais Elétricas do Norte do Brasil) e a implantação do reservatório do Batatã, respectivamente.

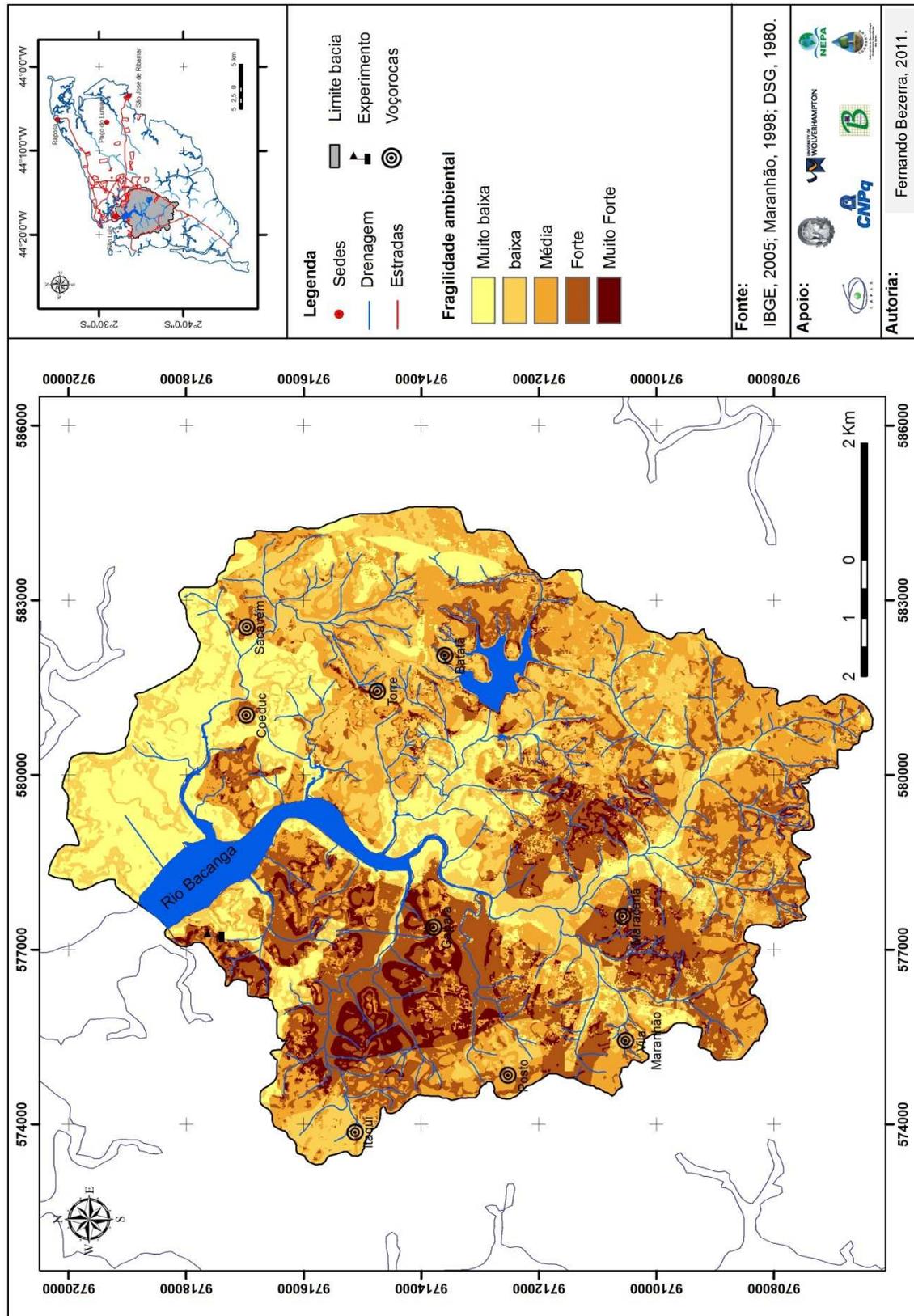


Figura 67 – Mapa de fragilidade ambiental da bacia do rio Bacanga.

## 7.6 Estação experimental

### 7.6.1 Índice de cobertura vegetal

O índice de cobertura vegetal foi calculado mensalmente, resultando em seis fotografias digitais classificadas, na qual foi possível acompanhar o desenvolvimento da cobertura vegetal nas parcelas com geotêxteis e avaliar os efeitos desse parâmetro na proteção superficial do solo. Com essas informações, também foi possível avaliar os efeitos da cobertura vegetal sobre os dados de potencial matricial, escoamento superficial e transporte de sedimentos.

A cobertura vegetal e seu sistema radicular desempenham uma importante função na paisagem, protegendo o solo contra as ações dos agentes intempéricos, principalmente a água das chuvas e ação eólica. Além do mais, a sua malha de raízes facilita o processo de infiltração, garantindo o abastecimento de água para o lençol freático, bem como fornecendo matéria orgânica ao solo, que constitui um essencial parâmetro para a sua estabilidade (BUCKMAN & BRADY, 1976; COELHO NETTO, 2001; REICHARDT & TIMM, 2004; HU ZHEN-QI *et al.*, 2007).

HU Zhen-qi *et al.* (2007) analisando os fragmentos florestais baseado nos levantamentos com câmera digital e técnicas de sensoriamento remoto numa mina abandonada de carvão em Beijing, China, chegaram a seguinte conclusão sobre o índice de cobertura vegetal:

Com o rápido desenvolvimento do processamento de imagens digitais e das técnicas de fotografias, o levantamento de superfícies com fragmentos de cobertura vegetal com máquinas digitais de alta resolução está se tornando significativamente mais conveniente e preciso. Conseqüentemente, as estimativas de fragmentos da vegetação baseadas em levantamentos com câmeras digitais e sensoriamento remoto é uma nova técnica em desenvolvimento que merece mais atenção e aplicações (HU ZHEN-QI *et al.*, 2007).

O maior intervalo de crescimento da cobertura vegetal foi registrado entre os meses de fevereiro (0%) e março (33,35%). Nesse período, o crescimento da cobertura vegetal ocorreu devido à grande disponibilidade de água das chuvas, como também a função dos geotêxteis na manutenção da umidade superficial, e no ancoramento das sementes da gramínea, servindo como *mulch*, que são elementos essenciais para a germinação e desenvolvimento da cobertura vegetal. A menor diferença encontrada no índice de cobertura vegetal foi observada entre os meses de maio (75,88%) e junho (81,19%), atingindo 5,31%. Neste intervalo, percebe-se a importância da cobertura vegetal na proteção da superfície do solo, atingindo quase a totalidade do ponto amostral.

Bezerra (2006), comparando fotografias digitais com técnicas de sensoriamento remoto em estação experimental com geotêxteis de buriti, chegou aos seguintes resultados sobre o índice de cobertura vegetal:

O menor intervalo de crescimento da cobertura vegetal foi observado no início da germinação das sementes, atingindo uma taxa de ocupação de apenas 1,1%, no dia 04 de dezembro de 2006 da superfície, após duas semanas do plantio. Isso ocorreu devido às características das gramíneas utilizadas, que necessita deste período para germinar. A necessidade de um período de tempo para a incorporação do NPK e do calcário pode também ter influenciado o desenvolvimento. A maior taxa de cobertura vegetal foi observada entre os dias 03 e 08 de fevereiro de 2006, ocupando cerca de 30,7% da área e subindo para 47,1% em menos de uma semana. A grande disponibilidade de água pode ter sido o principal fator que influenciou o crescimento das gramíneas no período. Os geotêxteis foram se biodegradando e o solo exposto encoberto no ponto da fotocomparação, na medida em que as gramíneas foram crescendo (BEZERRA, 2006).

Outras pesquisas sobre índice de cobertura vegetal vêm sendo desenvolvidas, com os mais diferentes tipos de cobertura vegetal e aplicações.

Barreto *et al.*, 2010, analisando o índice de cobertura vegetal para cultivares de soja no sul de Minas Gerais, apresentaram que os valores coletados obtiveram uma amplitude de variação de 56 a 83%, sendo a cultivar FT Abyara e BR 162, as que apresentaram o menor e o maior valor, respectivamente.

Godoi *et al.*, 2008, avaliando o potencial de uso do lodo de esgoto na recuperação de uma área degradada, investigaram o índice de cobertura vegetal e a produtividade de *Stylosanthes guianensis* cv Mineirão, sendo analisados oito tratamentos: (T1) testemunha; (T2) adubação mineral; (T3) 20 Mg ha<sup>-1</sup> de biossólido; (T4) 20 Mg ha<sup>-1</sup> de biossólido + bio-estimulador; (T5) 40 Mg ha<sup>-1</sup> de biossólido; (T6) 40 Mg ha<sup>-1</sup> de biossólido + bio-estimulador; (T7) 60 Mg ha<sup>-1</sup> de biossólido; e (T8) 60 Mg ha<sup>-1</sup> de biossólido + bio-estimulador. Eles concluíram (2010) que não foram constatadas diferenças significativas entre os índices de cobertura vegetal nos tratamentos T2, T3, T5 e T7, ao final do experimento.

No mês de fevereiro, a média dos dados da classificação supervisionada nas parcelas com geotêxteis foi: 0% de cobertura vegetal, 51,62% de área protegida com geotêxteis e 48,38% de superfície exposta (Figura 68). Esses resultados revelam a significativa proteção da superfície do solo pelas geotêxteis biodegradáveis, com reduzido solo exposto, que refletiram nos dados do escoamento superficial e na perda de sedimentos. Neste mês destaca-se a ação dos geotêxteis na proteção da superfície do solo, uma vez que a cobertura vegetal não tinha se desenvolvido.

O percentual de ocupação dos geotêxteis no mês de fevereiro ofereceu proteção contra o efeito da energia cinética da chuva, responsável pela mobilização das partículas. As propriedades dos geotêxteis inerentes ao tecido vegetal retiveram à água, mantendo a umidade superficial, indispensável à germinação das sementes das braquiárias (Figura 69). Sobre a importância inicial dos geotêxteis na proteção

do solo, Fullen & Guerra (2002), através de um experimento em Gâmbia concluíram que o geotêxtil cria uma estabilidade, que permite o tempo necessário para o estabelecimento e crescimento da vegetação. Os autores também ressaltam seu controle sobre o efeito *splash*, escoamento superficial, diminuição da erosão superficial e fornecimento de matéria orgânica ao solo degradado.

Considerando os geotêxteis construídos a partir das fibras das palmeiras *Borassus* (*Borassus aethiopum*) e *Buriti* (*Mauritia flexuosa*), Bhattacharyya *et al.* (2009) afirmaram que os geotêxteis de *Borassus* reduziram significativamente ( $P < 0,05$ ) os valores totais da erosão por salpicamento a 90% quando comparado com as parcelas com superfície exposta ( $24.81 \text{ kg m}^{-2}$ ). Parcelas com geotêxteis de *Borassus* obtiveram 51% menor média da altura do *splash* que as parcelas com solo exposto. Entretanto, os geotêxteis de *buriti* não tiveram nenhum efeito significativo ( $P < 0,05$ ) na altura e erosão por *splash* (BHATTACHARYYA *et al.*, 2009).

Smets *et al.* (2009) investigaram a eficiência de três geotêxteis biodegradáveis na redução da perda de solos a partir de experimentos controlados em laboratório. Tratamentos incluíram três geotêxteis biodegradáveis (*Borassus*, *Buriti* e *Bambu*) e foram comparados com parcelas com solo exposto. Para as condições específicas experimentais, geotêxteis de *Borassus* reduziram as taxas de erosão numa média de 56%, geotêxteis de *Buriti* a 59%, e geotêxteis de *bamboo* a 66%, quando comparados a superfície com solo exposto.

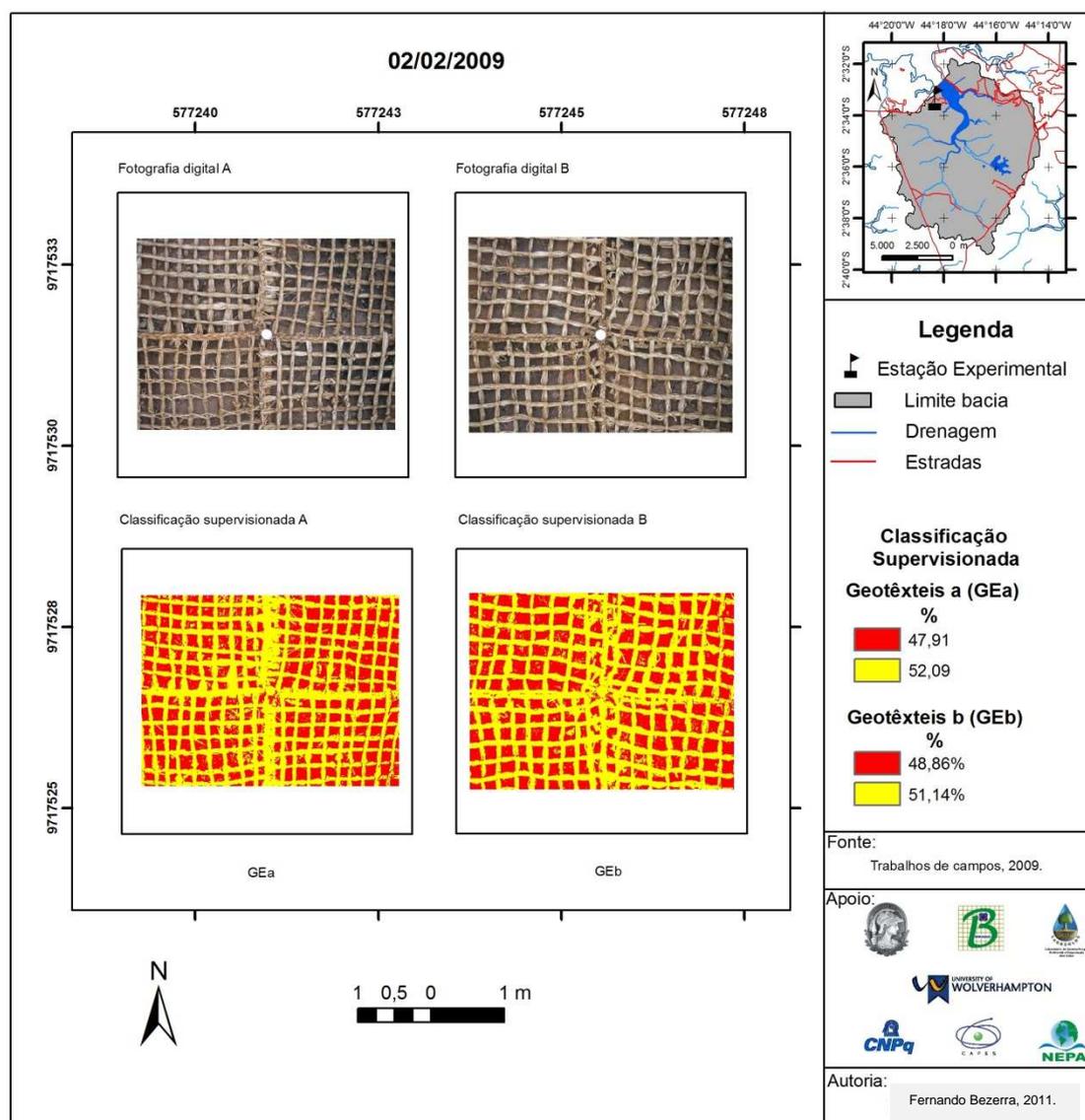


Figura 68 – Índice de cobertura vegetal do mês de fevereiro.

Em março, os resultados médios da classificação supervisionada atingiram 33,35 % no índice de cobertura vegetal, enquanto os geotêxteis 38,03 % e solo exposto 28,61% no ponto amostral. Ressalta-se a importância das duas na proteção superficial, que somadas chegaram a 71,4%, o que já garante proteção contra a ação das gotas de chuva, reduzindo o efeito *splash* e compactação do solo (Figura 70).

A vegetação incipiente oferece pouca proteção ao solo, mas reduz a superfície exposta. Com os resultados obtidos sobre os índices de vegetação, ocupação dos geotêxteis, e solo exposto, o processo de biodegradação dos geotêxteis ocorreu de forma não significativa, podendo ser apenas visualizados em alguns pontos. Em relação ao mês de fevereiro, a cobertura vegetal se desenvolveu 33,35% a mais, o geotêxteis e o solo exposto diminuíram 13,58% e 19,77%, respectivamente.



Figura 69 – Início do crescimento da cobertura de gramíneas, com geotêxteis de buriti servindo como *mulch*. Foto: Bezerra, 2009.

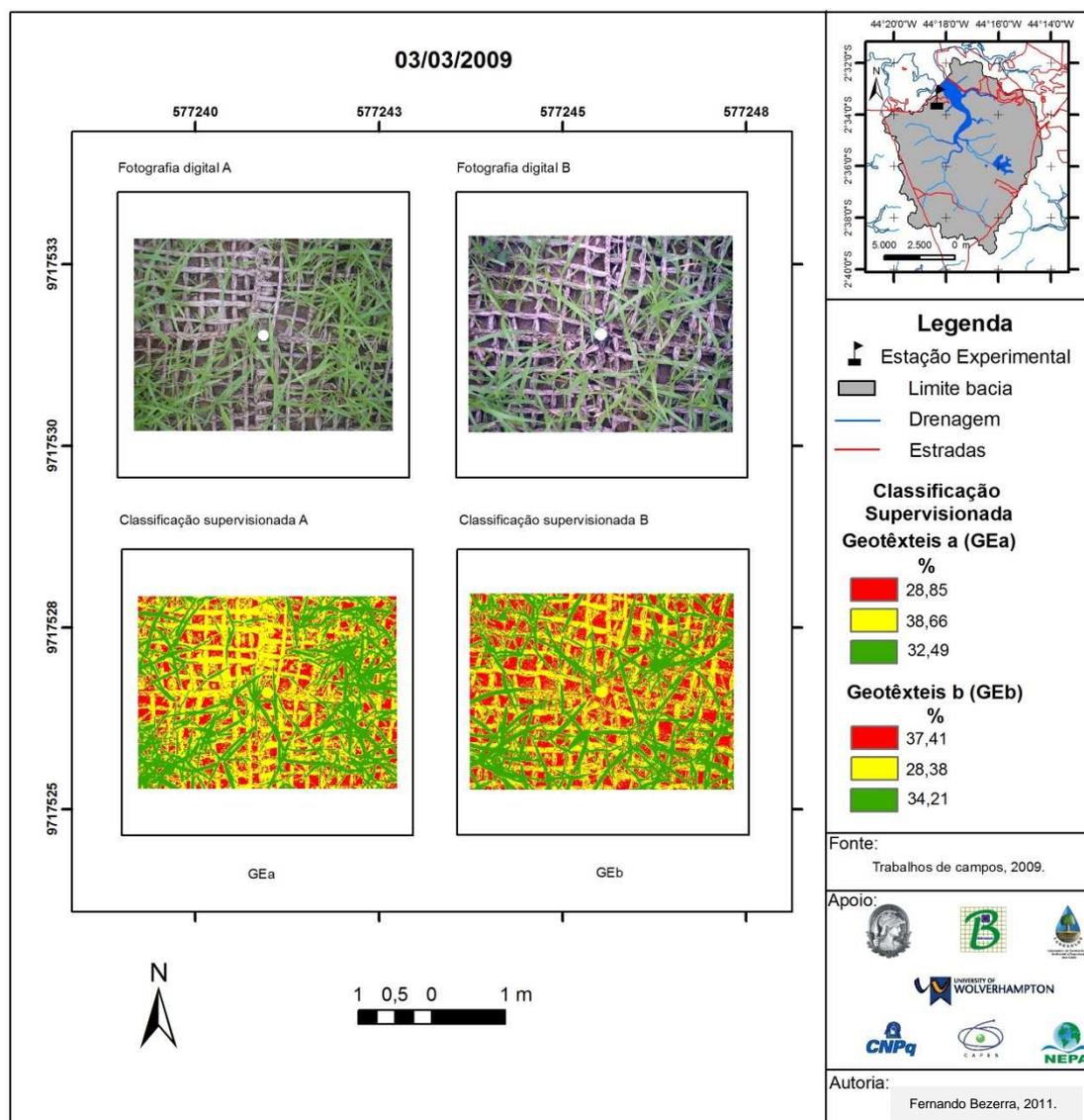


Figura 70 – Índice de cobertura vegetal do mês de março.

De acordo com Tauk (1990), o processo de biodegradação do tecido vegetal depende dos seguintes fatores:

Condições locais e regionais como clima, tipo de solo, vegetação, fauna e microrganismos decompositores. A diversidade bioquímica de substratos macromoleculares indica que os organismos devem possuir amplo espectro de enzimas extracelulares. As propriedades do solo, tais como, argila, pH, matéria orgânica, tensão de água e aeração atuam como fatores ambientais do processo de decomposição”. A água disponível influenciou também o processo de biodegradação dos geotêxteis, aliados aos outros agentes com a alta

temperatura, que culminou na disseminação da atividade biológica (TAUK, 1990).

Os valores médios da classificação no mês de abril foram 62,93 % no índice de cobertura vegetal, enquanto os geotêxteis 23,48% e solo exposto 13,58%. Ressalta-se a importância das duas na proteção superficial, que somadas chegaram a 86,41%, o que já garante proteção à superfície contra a ação das chuvas. No tocante ao mês anterior, a vegetação cresceu 29,58%, enquanto os geotêxteis e a superfície exposta diminuíram 14,55% e 15,03% respectivamente (Figura 71).

O mês de maio obteve os valores médios de 75,88% de índice de cobertura vegetal, 15,72%, nos geotêxteis e 8,39% na superfície descoberta. A cobertura vegetal e os geotêxteis somados protegeram 91,60% da superfície. Em relação ao mês anterior, houve um aumento de 12,95% da cobertura vegetal, e diminuição de 7,76% dos geotêxteis de buriti e 5,19% do solo exposto (Figura 72).

Secundariamente, os geotêxteis continuaram sua função de diminuição do escoamento superficial e retenção dos sedimentos, bem como mantendo a umidade superficial essencial para a germinação das novas sementes. O geotêxtil desempenhou a sua função de proteção do solo, agora sendo substituída pela vegetação (Bezerra, 2006).

Sobre os efeitos da interceptação de chuvas pela cobertura vegetal, Castilho & Filho (2001) pesquisando sobre a importância da cobertura vegetal na atenuação da precipitação que atinge o solo na cultura de cana-de-açúcar, concluíram que:

O processo de interceptação de chuvas pela vegetação apresenta como principais fatores a minimização do impacto das gotas de água na superfície e a expressiva redução da água que chega ao solo, fato comprovado na literatura onde os valores de interceptação se mostram bastante variáveis (podendo ser superiores a 40%). Pode-se verificar portanto, a efetiva ação da interceptação vegetal no combate à erosão e na diminuição de seus efeitos danosos como o assoreamento de rios e lagos, perda de nutrientes do solo, redução da qualidade das águas (CASTILHO & FILHO, 2001).

Sobre a importância das gramíneas na contenção da erosão superficial Silva *et al* (1999) em pesquisa realizada com parcelas com gramíneas e sem proteção em Iraí de Minas (MG) considera que a perda por erosão com essas condições de cobertura, depende da intensidade, duração e localização dos eventos chuvosos. Os autores ressaltaram (1999) que na estação chuvosa foi o mês de dezembro (1998), que ocorreu a menor perda de solo (0,002 kg), destacando a importância da cobertura vegetal (pastagem) na proteção do solo, impedindo ou diminuindo a ação da erosão por salpicamento e o arraste laminar das partículas e minerais do solo.

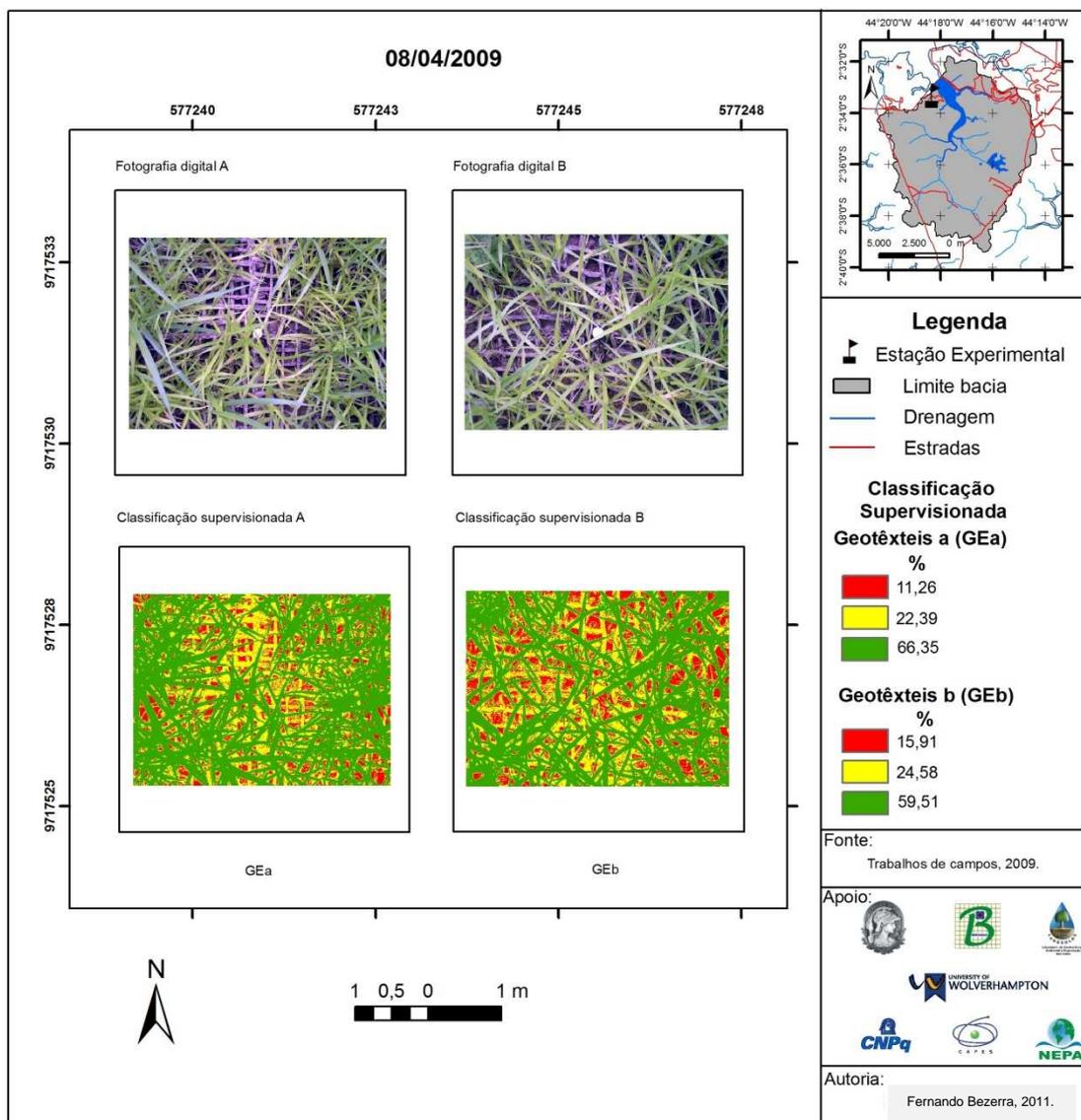


Figura 71 – Índice de cobertura vegetal do mês de abril.

Fatahia *et al.* (2010) investigaram as influências da vegetação no solo no sul da Austrália, mostrando sua relação com o potencial matricial. Segundo eles as raízes fornecem três funções na estabilização: (a) reforço do solo, (b) dissipação do excesso de poro-pressão, e (c) estabelecimento de suficiente potencial matricial para diminuir o grau de cisalhamento do solo.

Li e Eddleman (2002) demonstraram em seus estudos, a influência da folhagem e do tronco nas margens do rio nos Estados Unidos. Eles concluíram que:

As propriedades da vegetação reduzem a superfície de erosão através de: (a) interceptação das gotas de chuva, prevenindo a compactação do solo e mantendo altas taxas de infiltração, (b) “quebrando” a velocidade do escoamento superficial na superfície, (c) diminuindo o destacamento de partículas do solo através sistema de raízes, e conseqüentemente, reduzindo o transporte de sedimentos e (d) atrasando a saturação do solo devido à transpiração (LI & EDDLEMAN, 2002).

De Baets *et al.* (2006) analisando o impacto do sistema de raízes na erodibilidade da superfície do solo e comparando os efeitos da cobertura vegetal sobre as taxas de erosão em lençol e concentrada, bem como os efeitos da área de raiz sobre as taxas relativas de destacamento do solo em estação experimental na Bélgica. Eles afirmaram que:

Os dados sugeriram que as raízes das gramíneas foram eficientes na redução das taxas de destacamento do solo. As equações obtidas podem ser usadas para prever os efeitos das raízes das gramíneas durante o escoamento superficial concentrado, como também avaliar a habilidade das raízes em aumentar a resistência da superfície do solo contra a erosão por fluxo concentrado (DE BAETS *et al.* 2006).

Sobre a influência das gramíneas na água do solo Coelho Netto (2001) ressalta que:

Uma vez atendida a demanda (sucção das raízes e solo) das gramíneas, a água excedente pode gerar fluxos de “tronco”, como extensão dos fluxos d’água provenientes diretamente das folhas. A convergência das folhas em direção a um núcleo comum de enraizamento propicia maior favorecimento à produção do chamado fluxo de tronco, o qual, em conjugação com o sistema radicular da

gramínea, implicará sensíveis variações espaciais das quantidades de precipitações terminais que penetram à superfície mineral (COELHO NETTO, 2001).

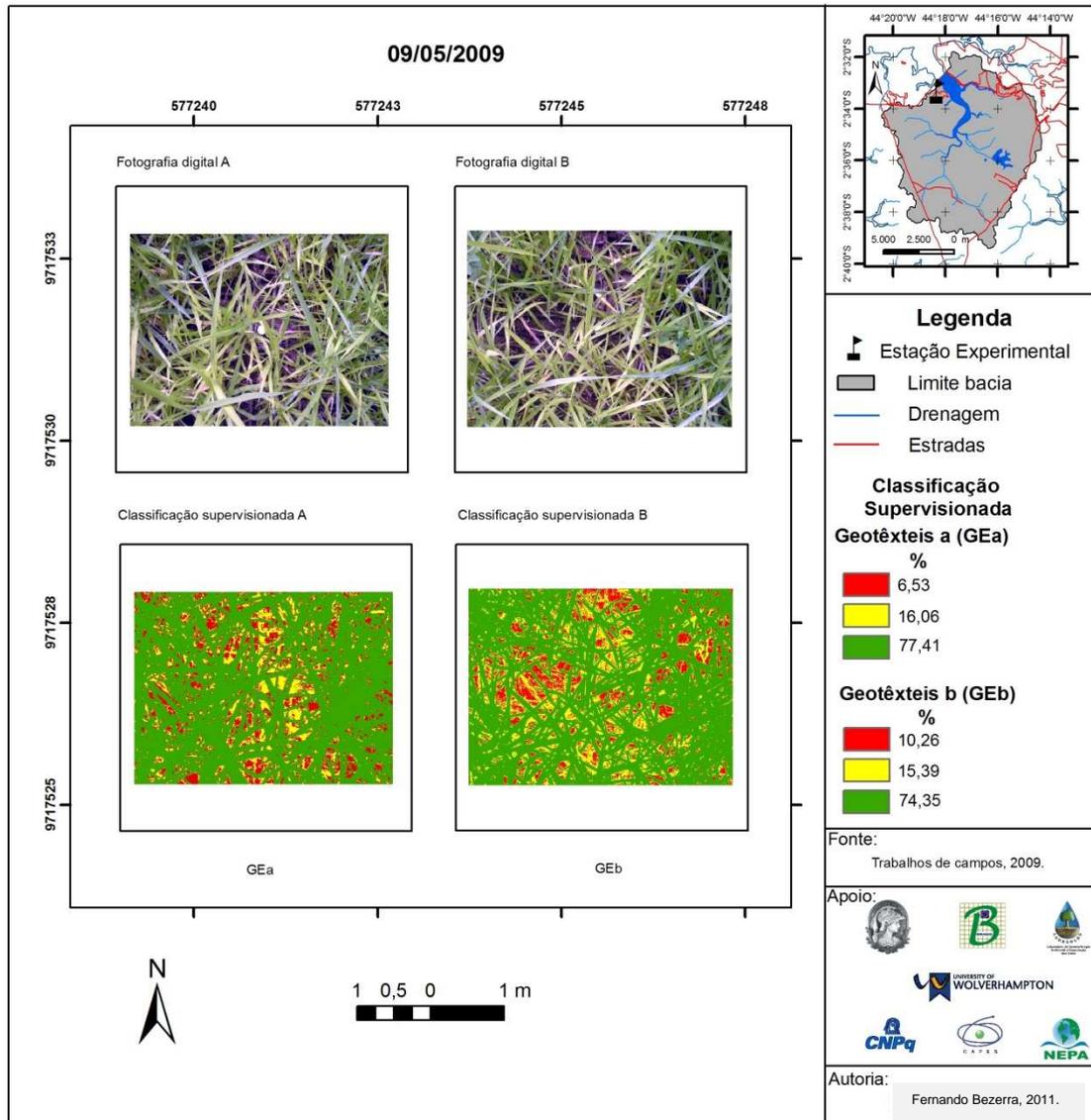


Figura 72 – Índice de cobertura vegetal do mês de maio.

No mês de junho, a média dos dados da classificação supervisionada nas parcelas com geotêxteis foi: 81,19% de cobertura vegetal, 11,43% de área protegida com geotêxteis, e 7,37% de superfície exposta. Destaca-se a importância das duas na proteção da superfície do solo, que somadas chegaram a 92,62%. Em relação ao

mês de junho, a cobertura vegetal se desenvolveu 5,31% a mais, os geotêxteis diminuíram 4,29% e o solo exposto 1,02%.

Em julho, os resultados médios da classificação supervisionada da cobertura vegetal no ponto amostral chegaram a 100%. Em se tratando do mês anterior, o índice de cobertura vegetal cresceu 18,81%, os geotêxteis diminuíram 11,43%, e o solo exposto 7,37% (Figura 73). O acompanhamento do crescimento da cobertura de gramíneas pode ser visualizado a partir de fotografias frontais do experimento (Figuras 74, 75, 76, 77).

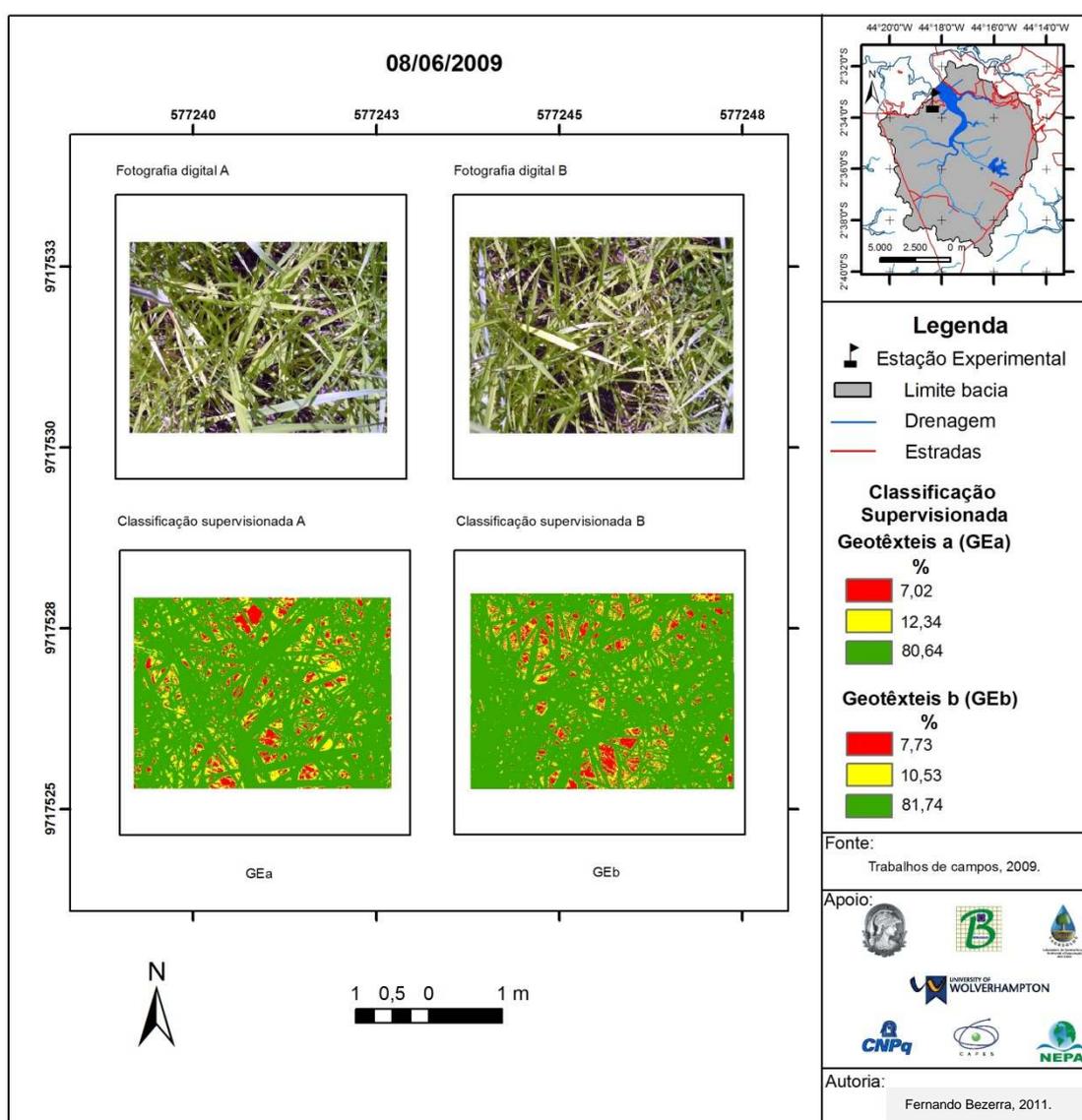


Figura 73 – Índice de cobertura vegetal do mês de junho.



Figura 74 – Estação experimental sem a presença de cobertura de gramíneas.

Foto: Bezerra, 2009.



Figura 75 – Estação experimental com cobertura de gramíneas no dia 03 de março de 2009. Foto: Bezerra, 2009.



Figura 76 – Estação experimental com cobertura de gramíneas no dia 21 de abril de 2009. Foto: Bezerra, 2009.



Figura 77 – Estação experimental com cobertura de gramíneas no dia 17 de maio de 2009. Foto: Bezerra, 2009.

### 7.6.2 Pinos de erosão

Os resultados obtidos sobre os pinos de erosão apresentaram diferenças nas taxas de erosão e deposição das superfícies nas réplicas com solo exposto. As análises granulométricas demonstraram pequenas diferenças na distribuição granulométrica entre as parcelas com solo exposto (SE), sendo que a média da textura da parcela SEa (Solo exposto a) foi 7,14 % de argila, 77,39% de silte e 15,48% de areia e na SEb (Solo exposto b) foi 7,50 % de argila, 77,69% de silte e 14,81% de areia. A textura foi classificada como 40% silte e 60% franco-siltoso. Esses resultados somados com outros componentes, como a frequência e magnitude das chuvas, propriedades físicas do solo, podem ter influenciados as taxas de erosão/deposição nas parcelas, uma vez que o transporte do sedimento mais fino é facilitado. Além disso, os caminhos preferências do escoamento superficial, podem também ter influenciado os resultados. Erosão por salpicamento e diferencial foi observada nas parcelas (Figuras 78, 79).

Bagarello *et al.* (2011), investigando a erosividade das parcelas com solo exposto, com comprimentos variando de 11 a 44 m e declividade de 10 a 26% em três diferentes estações na Itália, concluíram que:

A atual pesquisa sobre os processos erosivos causados pela chuva reconhece que o escoamento superficial é um fator primordial e independente nos modelos da erosividade, desde que a perda de solos seja o resultado do fluxo superficial e do acúmulo de sedimentos. A abordagem desenvolvida nesta pesquisa baseou-se na hipótese que acumulação de sedimentos aumenta com a força do evento que gera o escoamento, e que foi influenciado pelo comprimento das parcelas em moderada declividade. Em outras palavras, os resultados obtidos nos experimentos mostram que o fluxo superficial teve uma ação significativa (BAGARELLO *et al.*, 2011).

Morgan *et al.* (1997) analisando o fluxo superficial e transporte de sedimentos em experimentos em Suazilândia, com quatro diferentes porcentagens de gramíneas (0, 15, 50 e 90%) em parcelas com 1 m<sup>2</sup> com chuvas simuladas de 75 mm/h com duração de 15 minutos, afirmam que:

O acúmulo dos sedimentos está relacionado com as descargas, sendo o coeficiente de correlação baixa. Isso porque, com única exceção no experimento, o pico da concentração dos sedimentos ocorreu no período de três minutos depois do início do escoamento, ao mesmo tempo em que o pico do escoamento superficial ocorreu nos últimos três minutos da chuva simulada. Isso demonstra a importância das condições iniciais da parcela no que se refere ao deslocamento das partículas do solo. Portanto, parece ser aceitável assumir que o transporte de sedimentos nas parcelas, tenha provavelmente chegado à total capacidade e que o transporte foi controlado pela capacidade de carga, nos quais os sedimentos foram fornecidos pelo escoamento através da movimentação das partículas do solo a partir dos efeitos do impacto das gotas de chuva, sendo este, limitado. Possivelmente, se o experimento fosse realizado em parcelas maiores, o escoamento superficial seria capaz de desempenhar uma maior função, sendo que a influência da vegetação se tornaria mais pronunciada. A velocidade do fluxo aumentaria mais rapidamente na parcela com solo exposto que na parcela com vegetação (MORGAN *et al.*, 1997).

As diferenças entre os pinos de erosão/deposição entre as duas réplicas foram significativas pelo teste não-paramétrico Kruskal-Wallis ( $P < 0,001$ ). As diferenças foram significativas pelo teste de Nemenyi-Damico-Wolfe-Dunn ( $P < 0,001$ ) entre os pinos: SEa (Pino m) vs SEa (Pino j); SEa (Pino m) vs SEb (Pino j); SEa (Pino p) vs SEb (Pino j); SEa (Pino f) vs SEb (Pino j); SEa (Pino n) vs SEa (Pino m); SEa (Pino o) vs SEa (Pino m); SEb (Pino q) vs SEa (Pino m); SEb (Pino a) vs SEa (Pino m); SEb (Pino d) vs SEa (Pino m); SEb (Pino j) vs SEa (Pino m); SEa (Pino p) vs SEa (Pino n); SEa (Pino f) vs SEa (Pino n); SEa (Pino p) vs SEa (Pino o); SEb (Pino b) vs SEa (Pino o); SEa (Pino f) vs SEa (Pino o); SEb (Pino f) vs SEa (Pino o); SEb (Pino a) vs SEa (Pino p); SEb (Pino d) vs SEa (Pino p); SEa (Pino f) vs SEb (Pino a); SEa (Pino f) vs SEb (Pino d). Outras comparações não foram significativas pelo teste de Nemenyi-Damico-Wolfe-Dunn ( $P > 0,001$ ) (Tabela 17).

Tabela 17 – Resultados do monitoramento dos pinos de erosão nas duas parcelas com solo exposto.

## Pinos de Erosão – SEA (cm)

Data	Pa	Pb	Pc	Pd	Pe	Pf	Pg	Ph	Pi	Pj	Pl	Pm	Pn	Po	Pp	Pq	Soma	Diferença
02/02/2009	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	80	0
03/03/2009	5	5,2	5,3	5	5	4,4	4,9	4,8	5,4	5,5	4,8	3,6	5,3	6	4,5	5	79,7	-0,3
08/04/2009	5	5,5	5,1	5,4	5	4,3	5	5	5,5	5,6	5	4	5,9	6,3	4,8	5,5	82,9	2,9
09/05/2009	5,3	5,4	5,8	5,4	5,2	4,5	5,5	5	5,5	5,4	5,3	4,3	6,4	7	4,9	5,2	86,1	6,1
08/06/2009	5,3	5,6	5,5	5,4	5,2	4,9	5,5	5,2	5,5	5,8	5,8	4,3	6	7	4,5	6	87,5	7,5

Autoria: Bezerra, 2011.

## Pinos de Erosão – SEB (cm)

Data	Pa	Pb	Pc	Pd	Pe	Pf	Pg	Ph	Pi	Pj	Pl	Pm	Pn	Po	Pp	Pq	Soma	Diferença
02/02/2009	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	80	0
03/03/2009	5,6	4,3	5	5	5	4,5	5	5	5	5,5	5,3	5,6	5	4,6	5	5,5	80,9	0,9
08/04/2009	6	5	5	5,8	5,6	5	5,4	5,5	5,8	6	5,6	5,7	5,5	5,2	5	5,6	87,7	7,7
09/05/2009	6,4	5	4,8	6	5,8	5	5,5	5,5	5,7	5,6	5,4	5,5	5,4	6	5,1	5,5	88,2	8,2
08/06/2009	6,5	5	6,1	6,1	5,7	5	5,5	5,7	5,8	5,9	5,6	5,6	5,6	6	5,1	5,6	90,8	10,8

Autoria: Bezerra, 2011.



Figura 78 – Erosão por salpicamento na parcela com solo exposto a.

Foto: Bezerra, 2009.



Figura 79 – Erosão diferencial, expondo as lateritas, na parcela com solo exposto b.

Foto: Bezerra, 2009.

As informações geradas sobre os pinos quando apresentadas no decorrer dos seis meses de monitoramento revelaram a dinâmica do transporte dos sedimentos nas superfícies das parcelas com solo exposto, sendo possível a identificação das áreas de erosão e deposição no experimento. Os valores acima de cinco centímetros foram classificados como áreas de erosão, enquanto os valores abaixo foram classificados como áreas de deposição. Para a comparação com o mês anterior, os valores crescentes representam a erosão e os decrescentes representam a deposição.

O mês de fevereiro caracterizou-se pelo início do monitoramento dos pinos, o nível do terreno das parcelas estava relativamente homogêneo, sem registros dos índices pluviométricos, responsáveis pela modelagem da superfície do solo a partir do efeito *splash* e escoamento superficial e, conseqüentemente, pela dinâmica do transporte dos sedimentos (Figura 80).

O mês de março apresentou predomínio da deposição na parcela SEa atingindo 0,3 cm na área total da parcela. Esse foi o único resultado obtido durante todo o monitoramento, onde a deposição superou a erosão. Por outro lado, a erosão foi predominante na parcela SEb chegando a 0,9 cm da área total. Os valores mínimos e máximos encontrados para esse mês variaram entre 3,6 cm (Pino **m**) e 6,0 cm (Pino **o**) na parcela SEa, e 4,3 cm (Pino **c**) a 5,6 cm (Pinos **a** e **m**) na parcela SEb. O total pluviométrico registrado nesse mês foi 345 mm, sendo o terceiro mês com maior índice (Figura 81).

Os pontos de perda de sedimentos identificados foram principalmente os pinos **b, c, i, j, n** e **o** na parcela SEa e os pinos **a, j, l, m** e **q** na SEb. As outras áreas predominaram a deposição. Os pinos **a, d, e** e **q** da parcela SEa, não apresentaram variação dos seus valores, enquanto na parcela SEb, os pinos **c, d, e, g, h, i, n** e **p** mantiveram os mesmos valores do início do monitoramento (Figura 81).

Thomaz & Antoneli (2008) estudaram o processo de erosão e degradação do solo em área cultivada com erva-mate (*Ilex paraguariensis*) no município de Guarapuava estado do Paraná, com três parcelas com 4 m<sup>2</sup>, com as seguintes características: 1. Parcela 1, com 17% de declive com cobertura vegetal; 2. Parcela 2, 20% de declividade, sem cobertura vegetal e 3. Parcela 3, 22% de declive, com solo exposto, processo laminar e sulco intenso. Thomaz & Antoneli (2008), utilizando pinos de erosão (20 cm, sendo 15 cm enterrando e 5 cm exposto) chegaram aos seguintes resultados:

A parcela 1, com cobertura vegetal, apresentou a maioria dos pinos com acúmulo de solo. A erosão neste local não foi tão alta como nas demais parcelas mensuradas. Houve mais tendência de redistribuição de solo na parcela, do que propriamente remoção. Entretanto, apresentou um rebaixamento médio de 0,28 cm. A parcela 2, capinada e dessecada, teve apenas um pino com acúmulo de solo. Porém, a erosão mensurada nessa parcela foi significativa indicando forte erosão. Nessa parcela, como na parcela 1 não havia processo erosivo instalado, mas após a retirada da cobertura vegetal a erosão do solo teve níveis tão alto quanto às áreas com forte erosão laminar e em sulco (parcela 3). A parcela 3 foi instalada num local onde havia forte processo erosivo, tanto laminar, quanto por sulcos, assim, nenhum pino apresentou acúmulo de solo. Conseqüentemente, essa parcela foi a que mais apresentou remoção de solo, bem como o rebaixamento da superfície foi mais homogêneo (Thomaz & Antoneli, 2008).

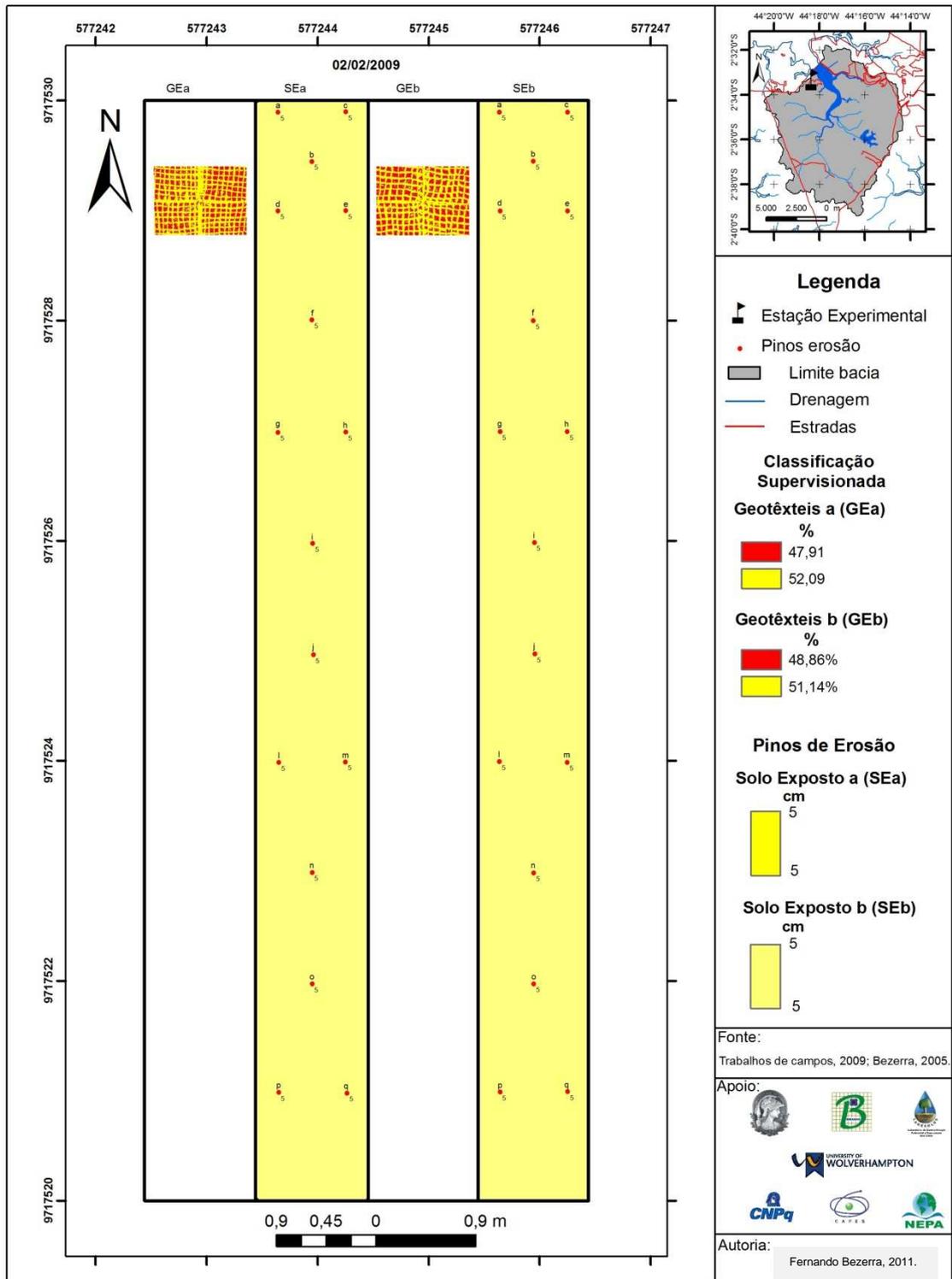


Figura 80 – Resultados do monitoramento dos pinos de erosão/deposição no mês de fevereiro.

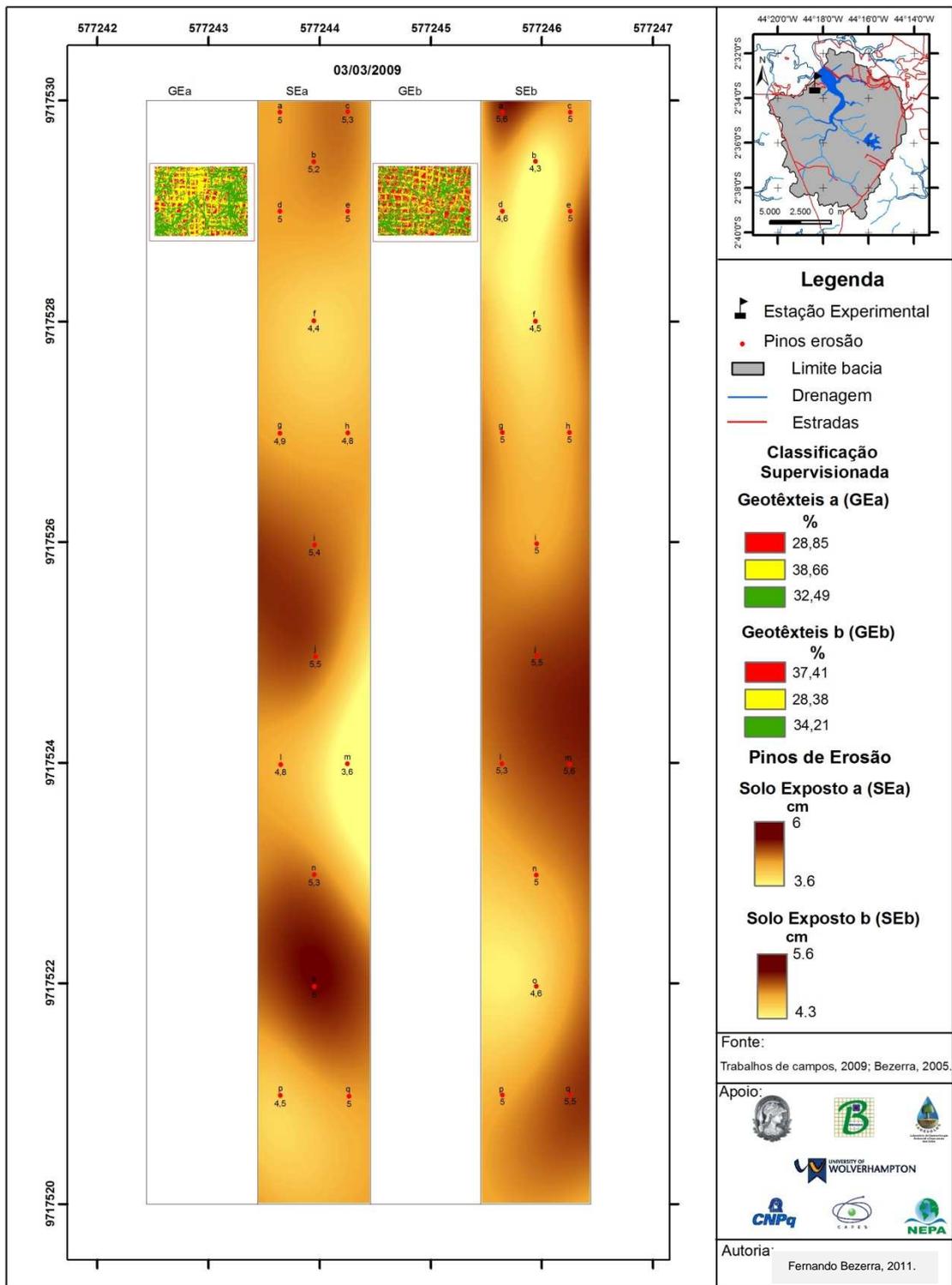


Figura 81 – Resultados do monitoramento dos pinos de erosão/deposição no mês de março.

As taxas de erosão do mês de abril para as áreas totais nas duas parcelas com superfície exposta prevaleceram no mês de abril, com destaque para a parcela SEb (7,7 cm) que foi mais que duas vezes maior que a SEa (2,9 cm). A diferença pode ser visualizada na figura 82, identificando-se várias áreas com predominância da erosão, diferentemente observado no outro segmento.

Os valores mínimos e máximos registrados para esse mês foram 4,0 cm (Pino **m**) a 6,3 cm (Pino **o**) na parcela SEa (os mesmos pinos do mês de março) e 5,0 cm (Pino **m**) a 6 cm (Pinos **a** e **j**) na parcela SEb. O índice pluviométrico total para o mês de abril foi 661,65 mm, o maior durante o monitoramento. As áreas com deslocamento de sedimentos (acima de cinco centímetros) foram os pinos **b, c, d, i, j, n, o e q** na parcela SEa e quase a totalidade dos pinos da parcela SEb, com exceção dos pontos **b, c e f** que não variaram.

Em comparação com o mês de março houve erosão em quase todos os pinos na parcela SEa, com exceção dos pinos **c, f** (deposição), **a e e** (não variaram). No segmento SEb predominou os processos de erosão, com exceção dos pinos **c e p** que não se alteraram.

Cremer (2004) investigando a sedimentação nas áreas próximas a canais com pinos de erosão em Santa Catarina, afirmou que:

De acordo com as leituras mensais efetuadas nos pinos de erosão localizados na Baía da Babitonga, pode se observar o acúmulo gradativo de partículas em praticamente todos os pontos. Observou-se uma amplitude de sedimentação de até 7,4 mm no ponto 3 (próximo a ilha do Mel), seguido pelo ponto 2 (bairro Espinheiros), na qual a amplitude atingiu 6,2 mm. Com relação aos totais acumulados, novamente a maior concentração de sedimentos ocorreu no ponto 3 (Ilha do Mel), atingindo na última medição 14,61 mm de sedimentos acumulados. No entanto, observou-se que este mesmo ponto atingiu a taxa de 20 mm, reduzida para 14,61 mm em pouco tempo. Os pontos 6, 7 e 5, respectivamente, também apresentaram valores elevados de deposição, pois todos, com exceção do ponto 3, estão localizados próximos a exutória dos rios Paranaguá-mirim, Parati e Ribeira, que contribuem com uma boa carga dentritica para o aterro do Linguado (CREMER, 2004).

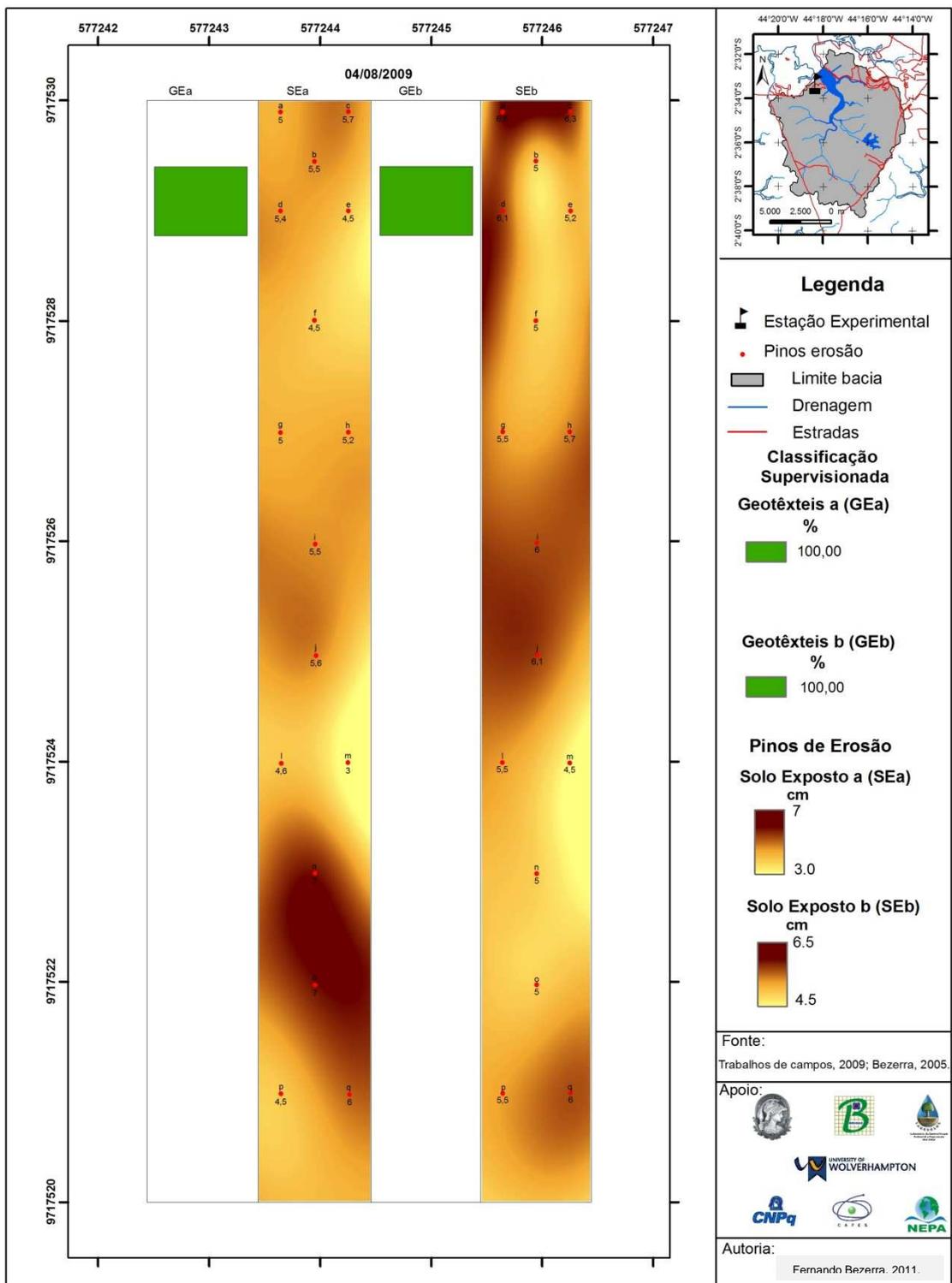


Figura 82 – Resultados do monitoramento dos pinos de erosão/deposição no mês de abril.

O mês de maio caracteriza-se pelos processos de erosão nas duas parcelas SEa e SEb, chegando a 6,1 cm a 8,2 cm na área total respectivamente. Os valores máximos e mínimos variaram entre 4,3 cm (Pino *m*) a 7 cm (Pino *o*) no segmento SEa e entre 5 cm (Pino *f*) e 6,4 cm (Pino *a*) no segmento SEb. Os índices pluviométricos totais obtidos para o mês de maio foram o segundo maior registrado no período, atingindo 650 mm (Figura 83).

No tocante aos pinos que indicaram os processos erosivos nas superfícies das duas parcelas, têm-se quase a totalidade dos pinos do experimento SEa, com exceção dos pinos *f*, *m* e *p* que foram deposição e o pino *h* que não sofreu alteração. O experimento SEb obteve taxa de deposição apenas no pino *c*; os pinos *b* e *f* se mantiveram; e os outros pinos as taxas de erosão foram predominantes (Figura 83).

Comparando com o mês de abril, os pinos que sofreram erosão na parcela SEa foram *a*, *c*, *e*, *f*, *g*, *l*, *m*, *n*, *o* e *p*; os pinos com deposição: *b*, *j* e *d*; e os pinos que não se alteraram: *d*, *h* e *i*. Na parcela SEb, os pontos de erosão foram: *a*, *d*, *e*, *g*, *o* e *p*; os pontos de deposição: *c*, *i*, *j*, *l*, *m*, *n* e *q*; e os pinos que não variaram: *b*, *f* e *h*. Os dados demonstraram que existem diferenças nas duas parcelas com superfície exposta, principalmente devido à erosão laminar.

Belotti (2005), analisando uma rede de pinos de erosão em duas áreas agrícolas localizados em Brumadinho/MG, a primeira sem adoção de medidas de conservação, e na segunda com quatro medidas de conservação do solo: preparo reduzido, plantio em curvas de nível, manutenção de faixas de vegetação permanente e incorporação de estrume de curral. Os resultados obtidos do monitoramento indicam uma perda de 14,2 ton solo/há na área sem conservação e 8,1 ton solo/ha na área com conservação de solo (BELOTTI, 2005).

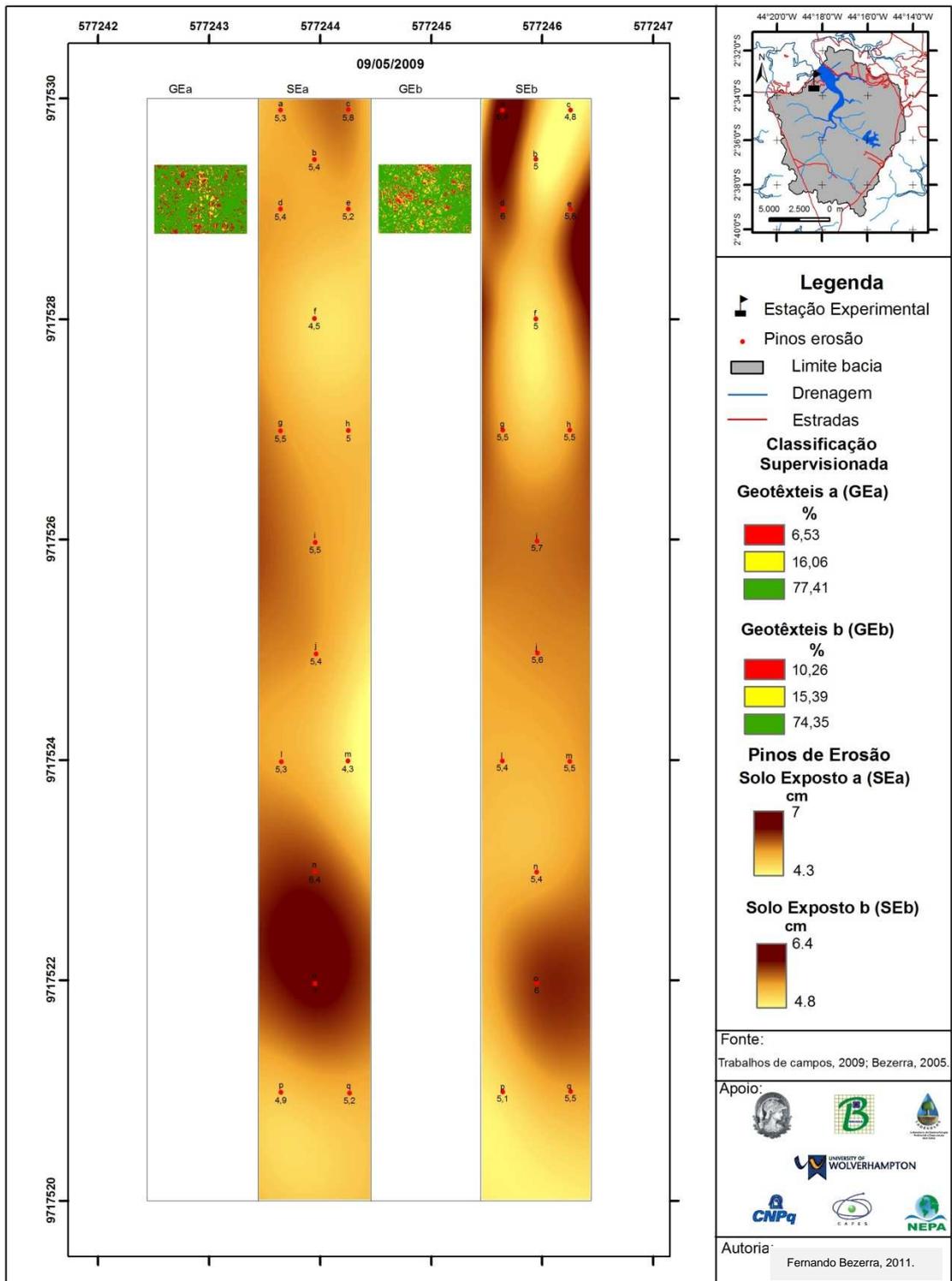


Figura 83 – Resultados do monitoramento dos pinos de erosão/deposição no mês de maio.

O mês de junho sofreu com o processo de erosão na área total das parcelas, sendo 7,5 cm na SEa e 10,8 cm na SEb. Na parcela SEa, os valores máximos e mínimos variaram entre 4,3 cm (Pino **m**) a 7,0 cm (Pino **o**), sendo os mesmos resultados do mês de maio, enquanto na parcela SEb variaram entre 5 cm (Pinos **b** e **f**) a 6,5 cm (Pino **a**). As chuvas totais para o mês de julho foram 166,75 mm, os menores totais registrados (Figura 84).

Os pontos na parcela solo exposto a (SEa) em que houve a predominância da erosão: **a, b, c, d, e, g, h, i, j, l, n, o** e **q**, enquanto os pinos **f, m** e **p** se caracterizam pela deposição. Na parcela SEb, os pinos que obtiveram erosão foram **a, c, d, e, g, h, i, j, l, n, o** e **q**; ao mesmo tempo que os pinos **b, f, m** e **p** não variaram. Em relação ao mês de maio, na parcela SEa houve erosão nos pinos: **b, f, h, j, l** e **q**. Por outro lado os pinos **c, n** e **p** apresentaram deposição e os pinos de erosão **a, d, e, g, i, m** e **o** não variaram em relação ao mês anterior. No segmento SEb, quando comparado com o mês de maio, os pinos **a, c, d, h, i, j, l, m, n** e **q** se caracterizaram pela erosão e apenas o pino **e** deposição. Os outros dados não apresentaram variação (**b, f, g, o** e **p**) no tocante ao mês anterior (Figura 84).

Borges (2009), trabalhando com pinos de erosão (30 cm), numa área que apresenta classe de potencial natural à erosão medianamente forte (Pasto sujo) na bacia do ribeirão Alam Grei – SP, constatou que:

A média dos valores de perdas de solo da parcela ultrapassou os 35mm, permanecendo com perdas de 17mm até o final do monitoramento. Constatou-se, por meio dos pinos da parcela, que estes obtiveram medidas bem maiores quando comparados às outras parcelas (cultura anual e cultura perene). Apenas os pinos de n. 1, 6, 11, 16, 22 e 24 apresentaram ao final do monitoramento medidas inferiores a 1,0 cm, onde se verifica que o pino de n. 6 apresentou valor zero no final da experimentação, contudo, este não estava soterrado, sendo possível a visualização do mesmo dentro da parcela. Dezesseis pinos apresentaram valores superiores a 1,0 cm, sendo que o pino n. 10 foi o que mais se destacou na parcela, apresentando 3,5 cm de medida no final do monitoramento (BORGES, 2009).

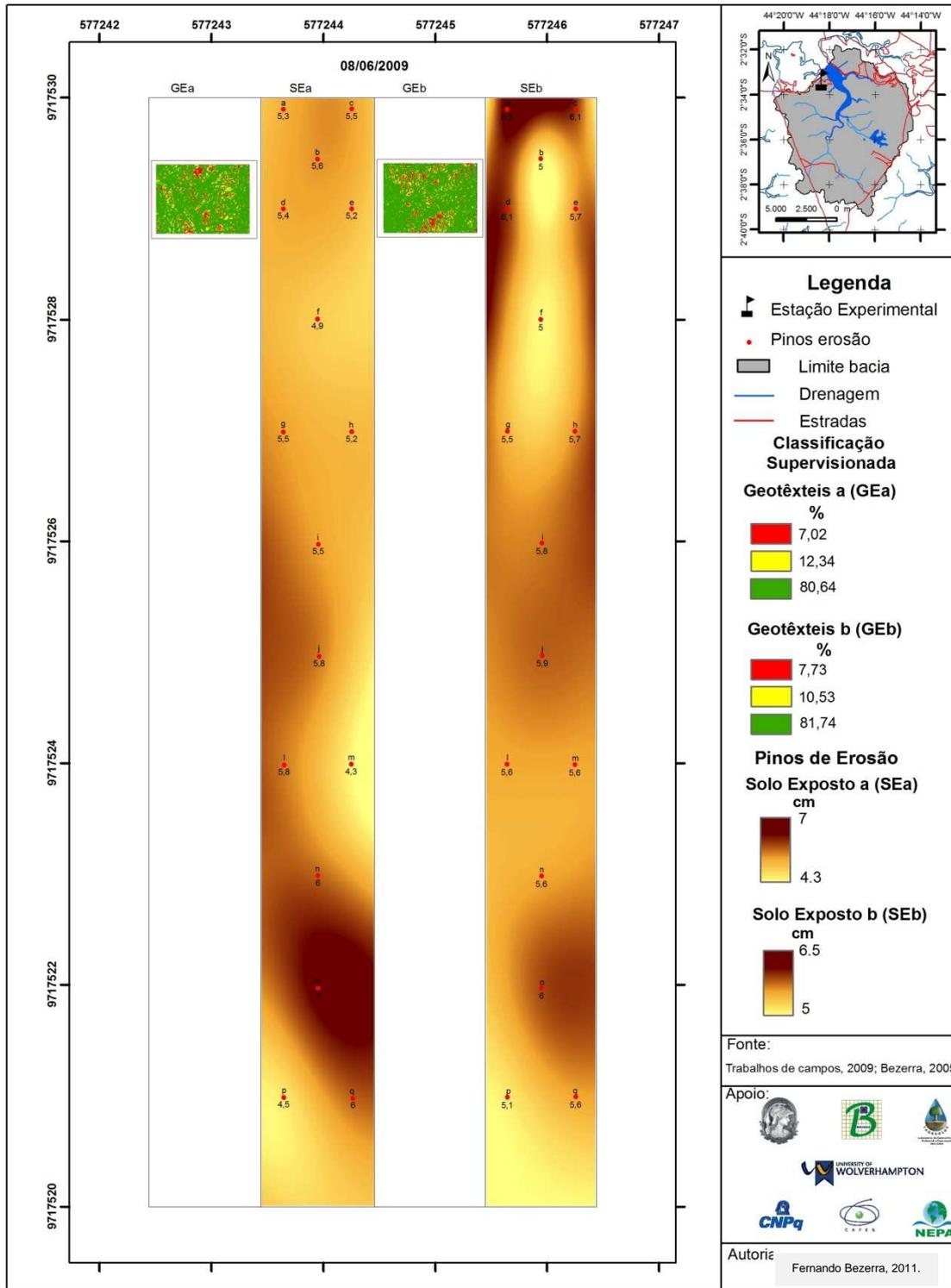


Figura 84 – Resultados do monitoramento dos pinos de erosão/deposição no mês de junho.

### 7.6.3 Potencial matricial

Faz-se neste capítulo uma análise sobre a dinâmica da circulação e disponibilidade hídrica no solo a partir dos dados de matricial potencial, levando em consideração duas parcelas (com réplicas): geotêxteis com gramíneas e solo exposto. Esses dados foram essenciais para identificação de zonas saturadas, subsaturadas e não saturadas no perfil do solo, fundamentais para o entendimento da geração do escoamento superficial e subsuperficial, que são de grande importância nos estudos dos processos erosivos (MORGAN 1981, 1995, 2001; GUERRA 1996, 1999; POESEN *et al.* 1999; REICHARDT & TIMM, 2004).

As características granulométricas da camada superficial do solo constituem importante parâmetro que influencia diretamente a circulação da água no solo. Os resultados das análises indicaram que em cinco centímetros de profundidade predominam os sedimentos finos, mas especificamente 40% das amostras na parcela com geotêxteis e gramíneas (GE) correspondem à fração franco-siltoso e 60% silte, enquanto no experimento com solo exposto (SE), 40% são caracterizados por silte e 60% franco-siltoso.

Os resultados obtidos indicam uma camada superficial com granulometria mais fina, podendo interferir no processo de infiltração da água e influenciar indiretamente nos dados de poro-pressão, uma vez que a água retida nos interstícios dos poros menores necessita de maiores poro-pressões para ser deslocada.

Bezerra (2006) fez um levantamento das características granulométricas em diferentes profundidades (15, 30, 80 e 120 cm) na parcela com geotêxteis de buriti na fazenda do Glória, Uberlândia – MG, com o intuito de correlacionar com os dados de potencial matricial, chegando aos resultados:

Na profundidade de 15 a 30 cm, há o predomínio de areia fina (48,7%), seguida de 22,4% de argila, 19,7% de areia grossa e 9,1% de silte. Entre 80 a 120 cm de profundidade, os solos apresentaram granulometria mais grosseiras com 45% de areia grossa, 31% de areia fina, 14,3% de argila e 9,6% de silte. Os dados apresentados indicam um solo superficial (15 a 30 cm) com granulometria mais fina, o que pode interferir no processo de infiltração, enquanto na profundidade de 80 a 120 cm, os materiais são mais grosseiros, podendo facilitar a passagem da água (BEZERRA, 2006).

Soccol *et al.* (2005) em experimento sobre disponibilidade hídrica da cultura do pimentão cultivado em solos arenosos e argilosos, chegaram a conclusão que:

Nos tensiômetros instalados em solo argiloso submetidos à tensão próxima a 40 kPa apresentaram maior tempo de resposta comparado àqueles instalados em solo arenoso, quando submetidos a tensões próximas de 60 kPa. O tempo de resposta não apresentou diferença para ambas as texturas de solos. Portanto, a textura do solo não influenciou os valores de condutância hidráulica e tempo de resposta das cápsulas cerâmicas (SOCCOL *et al.*,2005).

As diferenças entre os dados do potencial matricial nas profundidades de 10 cm, 20 cm, 40 cm e 60 cm nas parcelas com geotêxteis e solo exposto, foram significativas pelo teste estatístico não-paramétrico de Kruskal-Wallis ( $P < 0,001$ ) (Tabela 18).

As diferenças não foram significativas nos dados de poro-pressão negativas (kPa) de acordo com o teste de Mann-Whitney ( $P > 0,05$ ) entre as profundidades: Geotêxteis com gramíneas (10 cm) vs Solo exposto (20 cm); Geotêxteis com gramíneas (20 cm) vs Geotêxteis com gramíneas (40 cm); Geotêxteis com gramíneas (20 cm) vs Solo exposto (40 cm); Geotêxteis com gramíneas (40 cm) vs

Solo exposto (40 cm). Outras comparações foram significativas pelo teste de Mann-Whitney ( $P < 0,05$ ) (Tabela 18).

As diferenças encontradas indicam a heterogeneidade das propriedades dos solos nas profundidades estudadas, pois as forças originadas pela fração sólida, através dos fenômenos de adsorção e capilaridade, são as responsáveis pelas diferenças no potencial matricial. Outras propriedades do solo como a densidade aparente, porosidade e resistência do solo a compactação, influenciam também os dados de potencial matricial (REICHARDT & TIMM, 2004).

Guerra *et al.* (2006), estudando as propriedades do solo que influenciam os processos erosivos acelerados na Ilha do Maranhão, chegaram aos seguintes resultados:

Devido à intensa ação humana, os valores de densidade aparente foram altos (1.51-1.65 g/cm<sup>3</sup>), sendo que os valores de porosidades foram baixos (35.19-40.21%). De um modo geral, solos com baixa densidade aparente (1.51 g/cm<sup>3</sup>: Voçoroca do Bacanga) e alta teor de areia (85.53%: Bacanga) têm alta porosidade (40.21%: Bacanga). Por outro lado, os solos com alto teor de argila (14.63%: Voçoroca do Araçagi) apresentaram maiores densidade aparente (1.65 g/cm<sup>3</sup>) (GUERRA *et al.*, 2006).

Tabela 18 – Estatística descritiva dos dados de potencial matricial nas parcelas com geotêxteis com gramíneas e solo exposto.

<b>Parcelas</b>	<b>Tensiômetros</b>	<b>Média</b>	<b>DP</b>	<b>Min</b>	<b>Max</b>	<b>N</b>
<b>Geotêxteis</b>	T1 (10 cm)	-14,13*	21,01	-80,59	0,00	126
	T2 (20 cm)	-15,15*	18,18	-93,85	-4,52	126
	T3 (40 cm)	-13,76*	13,25	-63,71	-5,19	126
	T4 (60 cm)	-17,87*	7,31	-56,23	-13,78	126
<b>Solo Exposto</b>	T1 (10 cm)	-6,09*	9,67	-56,59	-0,63	126
	T2 (20 cm)	-8,73*	7,60	-49,18	-1,93	126
	T3 (40 cm)	-11,83*	9,43	-58,37	-3,52	126
	T4 (60 cm)	-13,39*	2,49	-24,23	-7,90	126
Índices pluviométricos	(mm)	34,38	47,52	323,00	0,00	63

\*A variável não tem distribuição normal em nível de 1% de significância ( $P > 0,01$ ).

Os resultados obtidos a partir da tensiometria nas profundidades de 10 cm, 20 cm, 40 cm e 60 cm, durante os meses de monitoramento, indicam uma diferença significativa ( $P < 0,001$ ) entre as parcelas com geotêxteis e com solo exposto. O período de mensuração dos dados de potencial matricial, iniciado no dia 02 de fevereiro e finalizado no dia 08 de agosto de 2009, demonstrou que na parcela com geotêxteis, houve melhoria na circulação da água no perfil. Isso ocorreu devido ao crescimento da cobertura de gramíneas e sua respectiva malha de raízes. Indiretamente os geotêxteis biodegradáveis também influenciaram nessa melhoria, devido ao ancoramento das sementes e manutenção da umidade superficial, indispensável à germinação.

Na parcela com geotêxteis e gramíneas, o valor máximo de poro-pressão alcançado foi na profundidade de 10 cm (0 kPa) nos dias 12 e 14 de abril de 2009, com 362,5 mm de chuva, com média de 62% de cobertura vegetal segundo os dados da fotocomparação, indicando a saturação de água no solo e geração de rápido escoamento superficial. Por outro lado, o valor mínimo do potencial matricial foi na profundidade de 20 cm, atingindo -93,85 kPa no dia 08 de agosto, com 0 mm de chuva e com 100% de cobertura vegetal, mostrando a ação da sucção do sistema radicular das braquiárias (Figura 85).

O valor mínimo (-93,85 kPa) registrado ocorreu devido a melhoria das condições de circulação de água no perfil, o que pode ter sido causado, pela maior permeabilidade e sucção proporcionadas pelas raízes das braquiárias. As informações geradas sobre os índices pluviométricos e o índice de cobertura vegetal foram importantes parâmetros que influenciaram as análises. As pressões negativas alcançaram seus menores valores quando as chuvas diminuíram e a área de

ocupação da cobertura vegetal estava aproximadamente acima de 90% do ponto amostral.

Na parcela com solo exposto (SE), o valor máximo registrado foi na profundidade de 10 cm, alcançando -0,63 kPa no dia 14 de abril, com 39,5 mm de chuva. É importante ressaltar, que a soma dos índices pluviométricos registrados nos dias anteriores foram 323 mm, o que vem a justificar a saturação do solo. O valor mínimo obtido de carga de pressão na parcela SE, depois de uma semana com baixa precipitação pluviométrica (~8 mm) foi de -58,37 mm na profundidade de 40 cm no dia 30 de julho (Figura 86). Esse valor pode ser um reflexo da compactação das camadas superiores do solo, com predominância de sedimentos finos, conforme já explicitado, bem com pela elevada taxa de evaporação, pois o mês de julho é o início do período de estiagem da região.

Os valores máximos e mínimos do potencial matricial em duas parcelas (solo exposto e geotêxteis de buriti) alcançados por Bezerra (2006) na região do Cerrado foram:

Os dados de potenciais matriciais obtidos pelos tensiômetros nas profundidades de 15, 30, 80 e 120 cm, durante o monitoramento entre 18 de novembro de 2005 a 30 de março de 2006 (período chuvoso) demonstraram uma grande diferença entre as parcelas com solo exposto e solo com geotêxteis. Na parcela com solo exposto, os dados registrados no dia 08 de março de 2006, com 77 mm de chuvas indicam a saturação da água no solo, atingindo o valor de 0,6 kPa. Por outro lado, no dia 24 de janeiro, após duas semanas de estiagem, com 1 mm de índice pluviométrico registrado no dia do monitoramento, a carga de pressão chegou a -27,7 kPa. Essa variação foi encontrada no tensiômetro de 15 cm e refletem a compactação das camadas mais superficiais, que impede uma maior infiltração da água no solo, como também elevadas taxas de evaporação, devido à ausência de cobertura vegetal (BEZERRA, 2006).

O tensiômetro de 60 cm na parcela com solo exposto se manteve praticamente constante durante o monitoramento, quando comparado aos

tensiômetros mais superficiais que sofreram maior influência das chuvas, infiltração, malha das raízes e evaporação. Os resultados alcançados do potencial matricial na parcela com solo exposto demonstraram as características de um solo com rápida saturação e acelerada formação do escoamento superficial, como também um solo com ineficiente circulação hídrica. Basicamente, a infiltração é a passagem da água através dos solos, sendo que as condições de suas camadas exercem uma importante influência nas taxas e na capacidade de infiltração, pois em alguns casos, as suas condições limitam as taxas de água que pode ser absorvida. A ausência ou incipiente cobertura vegetal no solo pode acelerar a formação de crostas através do processo de compactação em função do *splash*, reduzindo, conseqüentemente, a infiltração.

Silva e Pasqualetto (2007), analisando as taxas de infiltração em voçoroca na cabeceira do córrego Grota, no Município de Joviânia – GO, afirmaram que:

Durante um evento chuvoso, os espaços entre as partículas são preenchidos por água, e as forças capilares decrescem. Conseqüentemente as taxas de infiltração são maiores no início das chuvas. Observa-se que, quanto mais longa uma chuva, maior é a formação de enxurradas (*runoff*), isto porque o solo vai perdendo sua capacidade de infiltração, por estar compactado ou porque já está saturado. Nota-se que as taxas de infiltração variam ao longo do ano dependendo da maior ou menor quantidade de precipitação e das diferentes características dos solos. Solos arenosos possuem maior capacidade de absorção de água, ao passo que o argiloso, é menos permeável (SILVA E PASQUALETTO, 2007).

Sobre o processo de infiltração nas voçorocas da área urbana da Ilha do Maranhão, Mendonça *et al.* (2001) concluíram que os ensaios feitos apontaram para baixos índices de infiltração, apontando para altos índices de escoamento superficial, especialmente no período das chuvas concentradas, entre dezembro e julho.

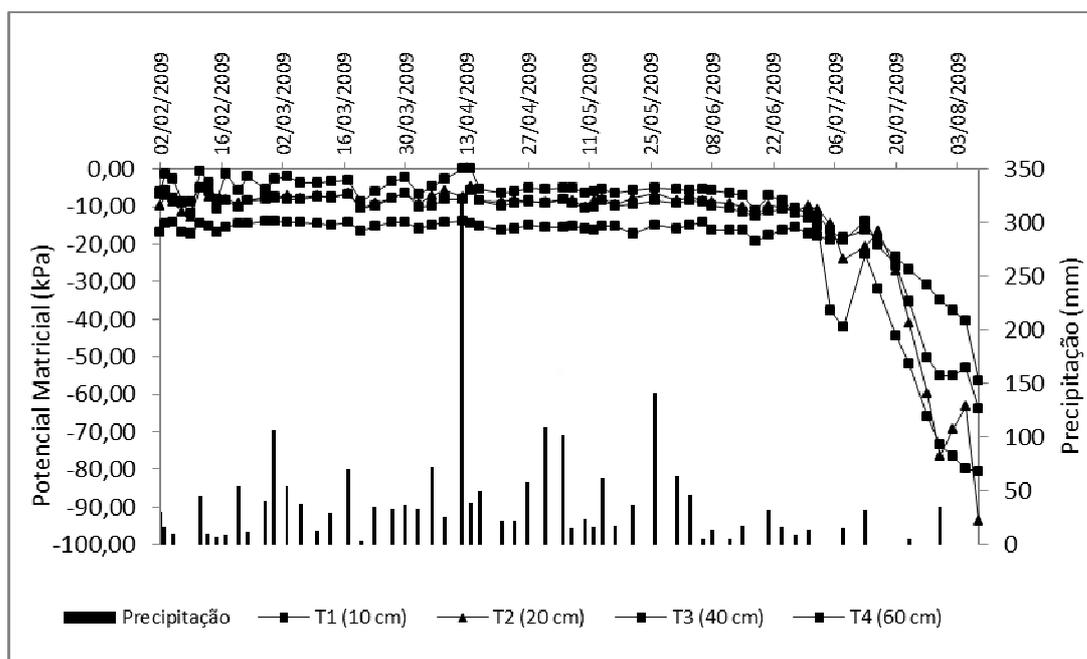


Figura 85 – Potencial matricial nas profundidades de 10 cm, 20 cm, 40 cm e 60 cm nas parcelas com geotêxteis com gramíneas. Autoria: Bezerra, 2011.

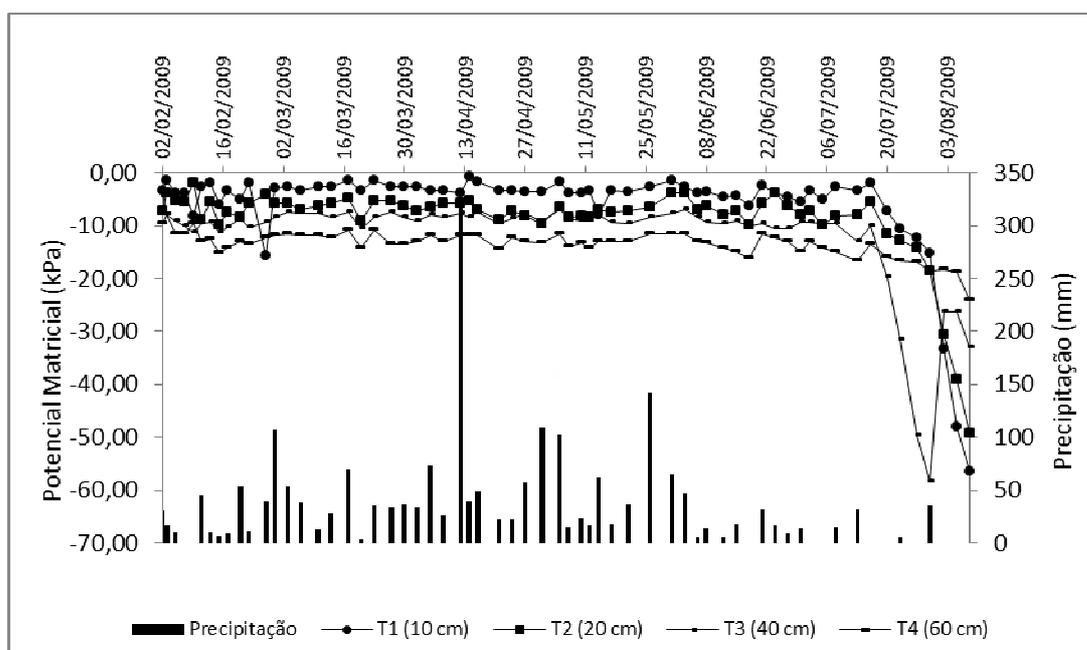


Figura 86 – Potencial matricial nas profundidades de 10 cm, 20 cm, 40 cm e 60 cm nas parcelas com solo exposto. Autoria: Bezerra, 2011.

Os dados obtidos sobre os potenciais matriciais no experimento relacionam-se diretamente à geração do escoamento superficial, e conseqüentemente, à perda de sedimentos, através da identificação de áreas saturadas, subsaturadas e não saturadas, a partir das diferenças de pressões dos sistemas água-poros no perfil do solo com geotêxteis e superfície exposta. Ao longo do monitoramento foram registrados 2.067,50 mm, gerando um fluxo superficial de 208,57 L m<sup>-2</sup> na parcela com geotêxteis e 494,63 L m<sup>-2</sup> na parcela com solo exposto.

Investigações sobre a relação potencial matricial e geração do escoamento superficial vem sendo analisadas por Mahmood-ul-Hassan and Gregory (2002) no sudeste da Inglaterra. Eles enfatizaram a utilidade de tensiômetros para o entendimento da dinâmica da água em zonas não saturadas de Upper Chalk. Eles concluíram que os freqüentes monitoramentos mostraram rápida mudança no conteúdo de água e potencial durante e depois eventos chuvosos e preferencialmente o escoamento superficial pode ocorrer até 1 metro do perfil.

Cattan *et al.* (2009) monitorando o escoamento superficial e o potencial matricial em Guadalupe, demonstraram que durante eventos pluviométricos que ocorrem o fluxo superficial, o potencial matricial aumenta principalmente a jusante da área dos caules das bananeiras. A delimitação da zona saturada e a propagação do escoamento subsuperficial foram acompanhadas através da utilização de câmeras.

Gutiérrez-Jurado *et al.* (2006) discutiram as interações entre cobertura vegetal, fluxo de água no sistema radicular e desenvolvimento do solo em pequena bacia de drenagem no Novo México, Estados Unidos. Eles concluíram que as diferenças encontradas no potencial matricial no horizonte K, indicou a habilidade das plantas de obter água de horizontes mais profundos do solo, durante período de escassez de água.

As informações coletadas a partir do monitoramento propiciaram o mapeamento das áreas de pressão, na qual foi possível discernir pontos saturados, subsaturados e não-saturados nos perfis analisados. A diferença de poro-pressão entre os pontos estudados depende de uma série de fatores, dentre eles a presença de micro e macroporos no solo, evaporação, absorção de águas nas zonas onde estão as raízes das plantas. A junção desses fatores causa diferenças na poro-pressão gerando a movimentação da água, das zonas de maior pressão negativa (alta umidade) para zonas de menor sucção (baixa umidade) (REICHARDT, 1985).

Os valores médios dos potenciais matriciais na parcela com geotêxteis e gramíneas variaram entre -14,13 (10 cm), -15,15 (20 cm), -13,76 (40 cm), e -17,87 kPa (60 cm) ao longo do monitoramento. Os resultados refletem a melhoria na circulação de água no solo, devido principalmente ao sistema radicular. Por outro lado, os dados médios da poro-pressão na parcela com solo exposto atingiram -6,09 (10 cm), -8,73 (20 cm), -11,83 (40 cm), e -13,39 kPa (60 cm), indicando um solo mais próximo a saturação, e conseqüentemente, rápida geração do fluxo superficial (Tabela 18).

Em relação ao mapeamento dos valores médios das sucções nas profundidades de 10 cm, 20 cm, 40 cm e 60 cm nas parcelas com geotêxteis e solo exposto (Figura 87), podem-se visualizar as diferenças entre as parcelas com essa técnica. Os resultados da interpolação indicam que acima da profundidade de 10 cm predominam zonas saturadas na parcela com geotêxteis, enquanto na parcela com solo exposto as áreas saturadas estão aproximadamente acima de 20 cm de profundidade. Abaixo dos 10 cm, os valores de sucção são maiores na parcela com geotêxteis, apresentando um perfil com menor teor de água. As maiores poro-pressões negativas na parcela com geotêxteis estão entre as profundidades de 40

cm e 60 cm. Esses dados interferem no processo de geração do escoamento superficial, tendendo a rápida saturação na parcela com solo exposto.

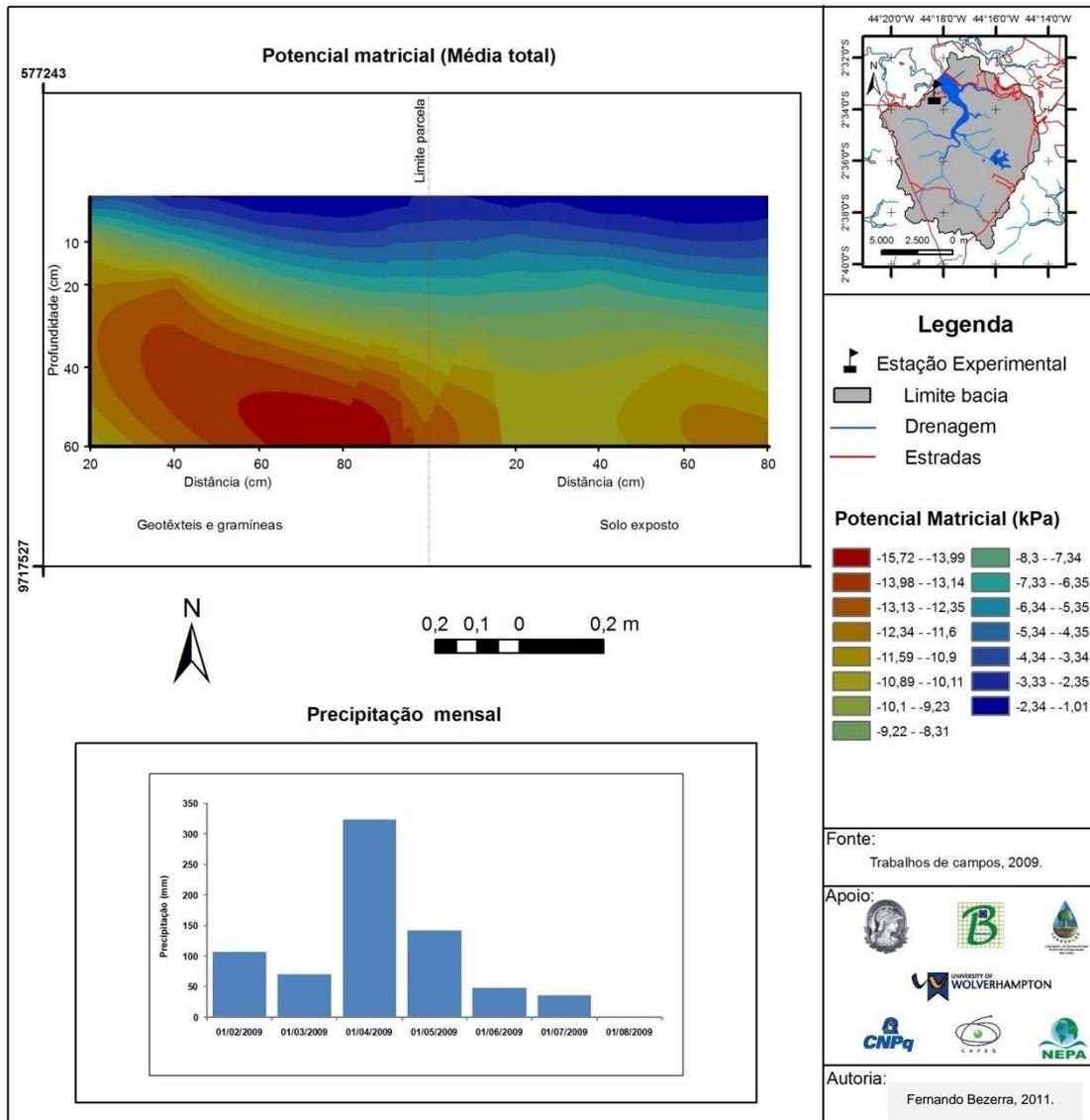


Figura 87 – Mapeamento dos valores médios das poro-pressões negativas nas profundidades de 10 cm, 20 cm, 40 cm e 60 cm nas parcelas com geotêxteis e solo exposto.

No tocante à sucção nas profundidades estudadas no mês de abril, na qual se registrou os maiores índices pluviométricos com 661,65 mm de chuvas, os resultados da interpolação demonstraram que acima de 20 cm de profundidade nas duas parcelas (geotêxteis e solo exposto), o solo encontrava-se saturado com água, principalmente próximo à superfície. Abaixo desse patamar, os resultados indicam um perfil subsaturado, sendo que as menores poro-pressões encontradas estão nas proximidades de 60 cm de profundidade na parcela com geotêxteis (Figura 88).

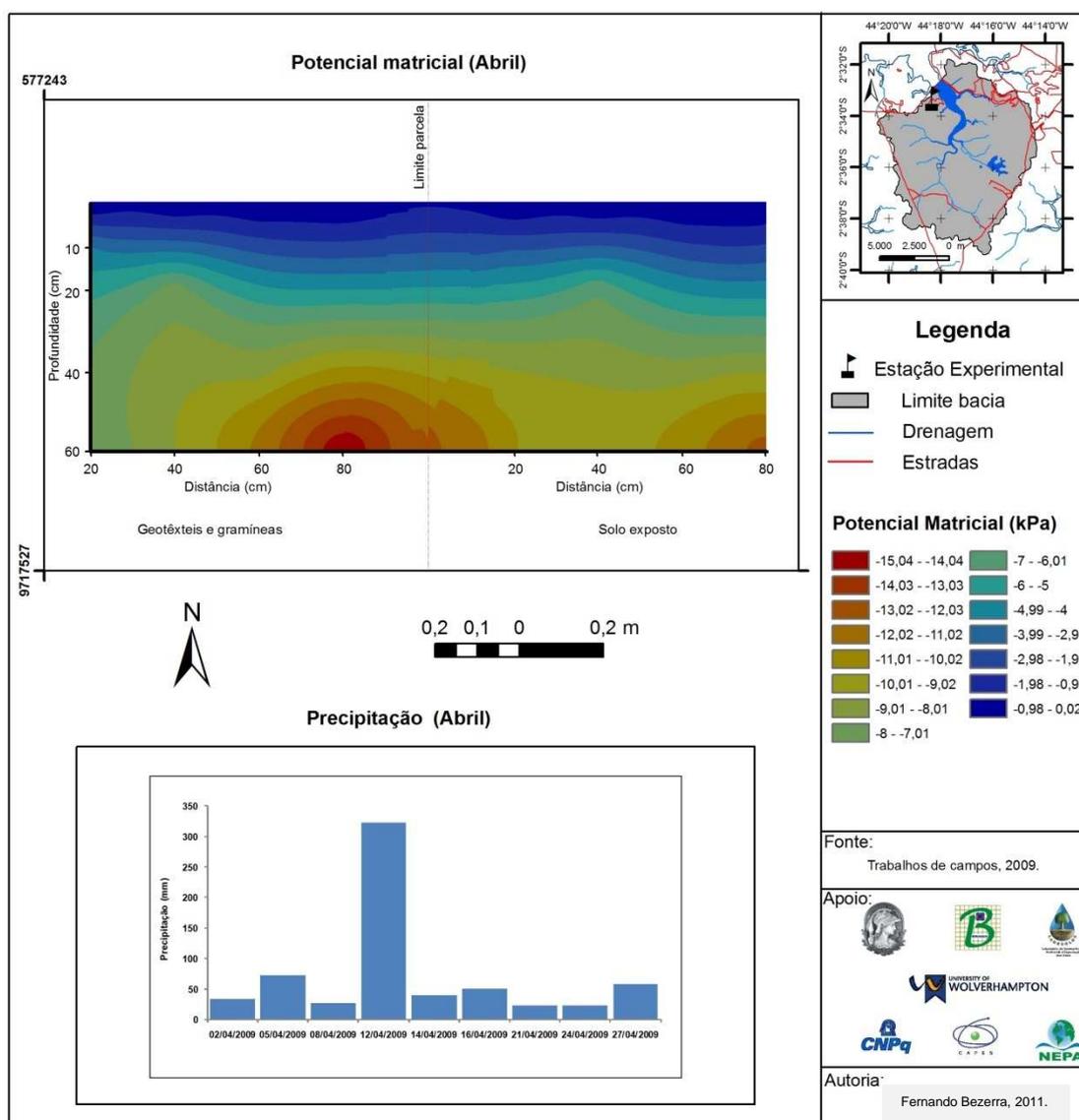


Figura 88 – Mapeamento das poro-pressões negativas nas profundidades de 10 cm, 20 cm, 40 cm e 60 cm nas parcelas com geotêxteis e solo exposto no mês de abril.

Em se tratando mês de julho, na qual se registrou os menores totais pluviométricos do período de monitoramento, com 89,24 mm de chuvas, observou-se uma grande diferença entre as parcelas (Figura 89). De um modo geral, os resultados alcançados para esse mês, indicaram que a parcela com geotêxteis em todas as profundidades, apresentou melhor circulação de água no solo, enquanto na parcela com solo exposto os dados estão bem mais próximos a saturação. Com menores quantidades de chuvas, a influência do sistema radicular das gramíneas influenciou diretamente na distribuição das pressões negativas no perfil, que necessitou de mais energia para retirada da água no solo, que estava retida nos poros menores.

A partir dos dados de potencial matricial, Bezerra (2006) analisou a movimentação do fluxo ascendente e descendente da água no solo, em estação experimental com duas parcelas (Geotêxteis e solo exposto), e demonstrou que:

A diferença de poro-pressão entre os pontos estudados depende de uma série de fatores, dentre eles a presença de micro e macroporos no solo, a evaporação e absorção de água nas zonas onde estão as raízes das plantas. A soma desses fatores gera diferenças no potencial matricial ocasionando a movimentação hídrica no perfil, dos pontos de maior pressão negativa (elevada umidade) para zonas de menor pressão negativa (baixa umidade). Essa diferença pode ser observada na parcela com geotêxteis, tendo como parâmetro o antes e depois do desenvolvimento da cobertura vegetal. Dessa forma, no dia 11 de dezembro de 2005 foi constatado o predomínio de movimentos descendentes, com ausência de cobertura vegetal, por outro lado no dia 10 de fevereiro de 2006 houve a circulação da água em fluxos ascendentes e descendentes, devido principalmente à atuação do sistema radicular das gramíneas e evaporação (BEZERRA, 2006).

Na estação experimental, o estudo do potencial matricial constituiu um importante parâmetro nos estudos do início e desenvolvimento dos processos erosivos, uma vez que fornecem informações relativamente precisas sobre a saturação dos solos, e conseqüentemente, a geração do escoamento superficial.

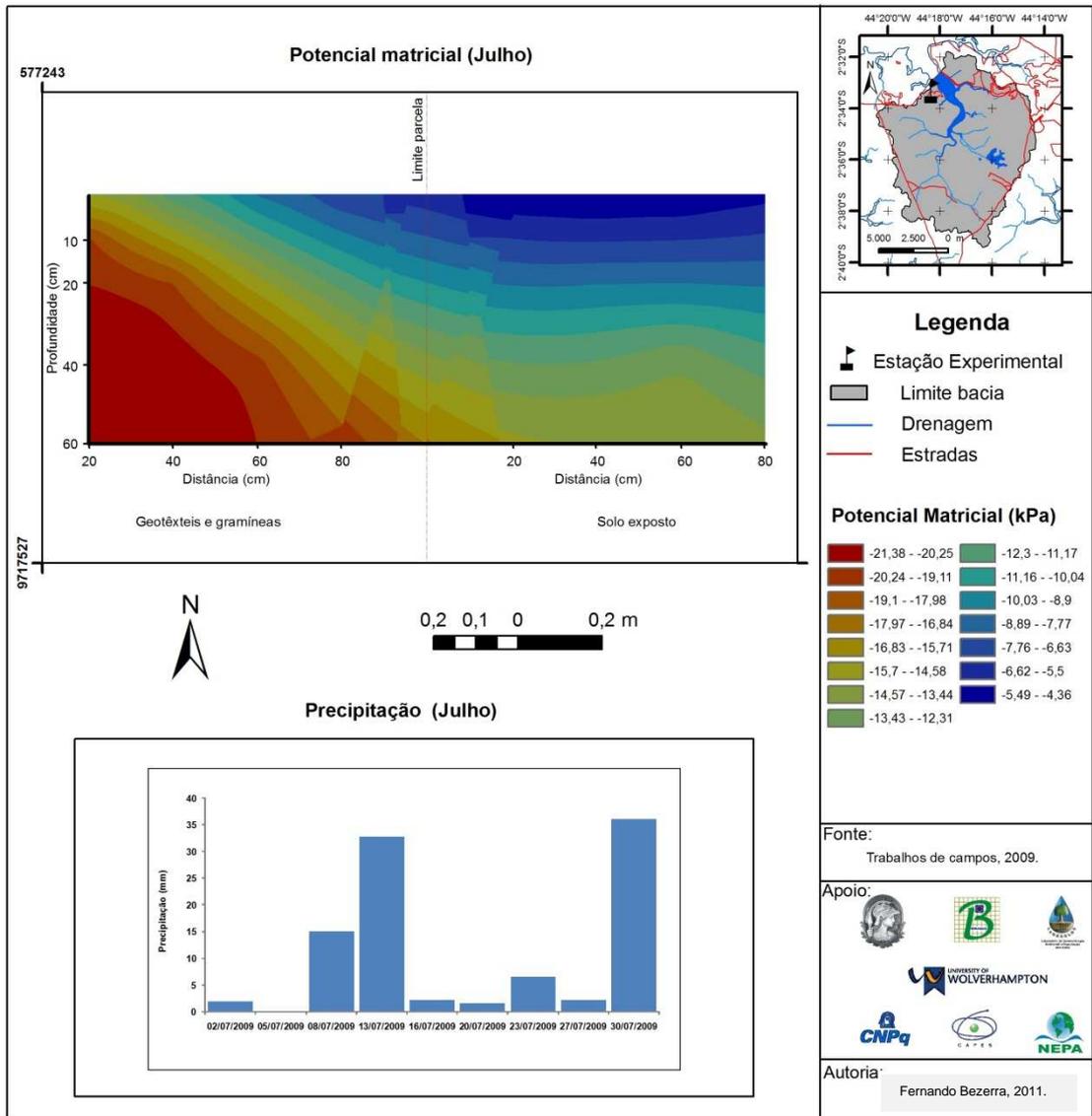


Figura 89 – Mapeamento das pro-pressões negativas nas profundidades de 10 cm, 20 cm, 40 cm e 60 cm nas parcelas com geotêxteis e solo exposto no mês de julho.

#### 7.6.4 Escoamento superficial e erosão

Faz-se neste item uma análise sobre a eficiência dos geotêxteis biodegradáveis e gramíneas na redução do escoamento superficial e perda de sedimentos na estação experimental. No período de monitoramento dessas duas variáveis, foram observados 2.067,50 mm de chuvas, produzindo um fluxo superficial total de 208,57 L m<sup>-2</sup> no experimento com geotêxteis e gramíneas e um escoamento de 494,63 L m<sup>-2</sup> na parcela com superfície exposta, bem mais que o dobro que a parcela com os biotêxteis (Figuras 90, 91, tabela 19).

Em relação à perda de sedimentos, os dados apresentaram diferenças significativas entre as duas parcelas, apontando para a eficiência dos geotêxteis e gramíneas como obstáculo para o transporte dos sedimentos. A parcela com os biotêxteis de buriti perdeu 255,85 g m<sup>-2</sup> de sedimentos, enquanto que o experimento com a superfície exposta chegou a 4.390,96 g m<sup>-2</sup> de sedimentos, mais que 17 vezes maior (Figuras 90, 91, tabela 19).

Bezerra (2006) analisando duas parcelas, uma com solo exposto e outra com geotêxteis de buriti na Fazenda do Glória, Uberlândia - MG, encontrou as seguintes diferenças entre as parcelas:

Durante o monitoramento, foram registrados 1.087,22 mm de chuvas, gerando um escoamento superficial de 2.991,6 L no solo exposto, enquanto o sistema com geotêxteis o fluxo superficial chegou a 1.289,2 L. No tocante a contenção dos processos erosivos, os resultados apontaram para uma diferença significativa no controle do transporte de sedimentos com os geotêxteis e gramíneas atingindo 13,18 kg/10 m<sup>2</sup>, enquanto o solo exposto chegou a 197,26 kg/10 m<sup>2</sup> (BEZERRA, 2006).

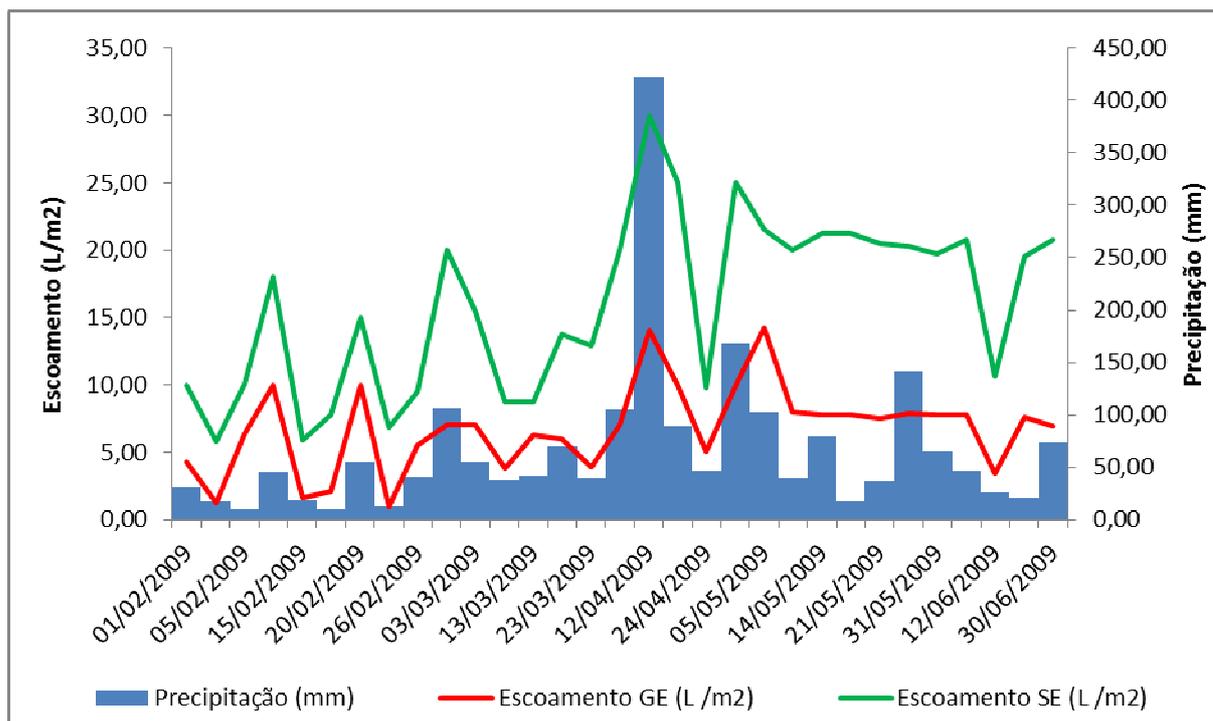


Figura 90 – Variação temporal do escoamento superficial na estação experimental.

GE = Geotêxteis com gramíneas; SE = Solo exposto.

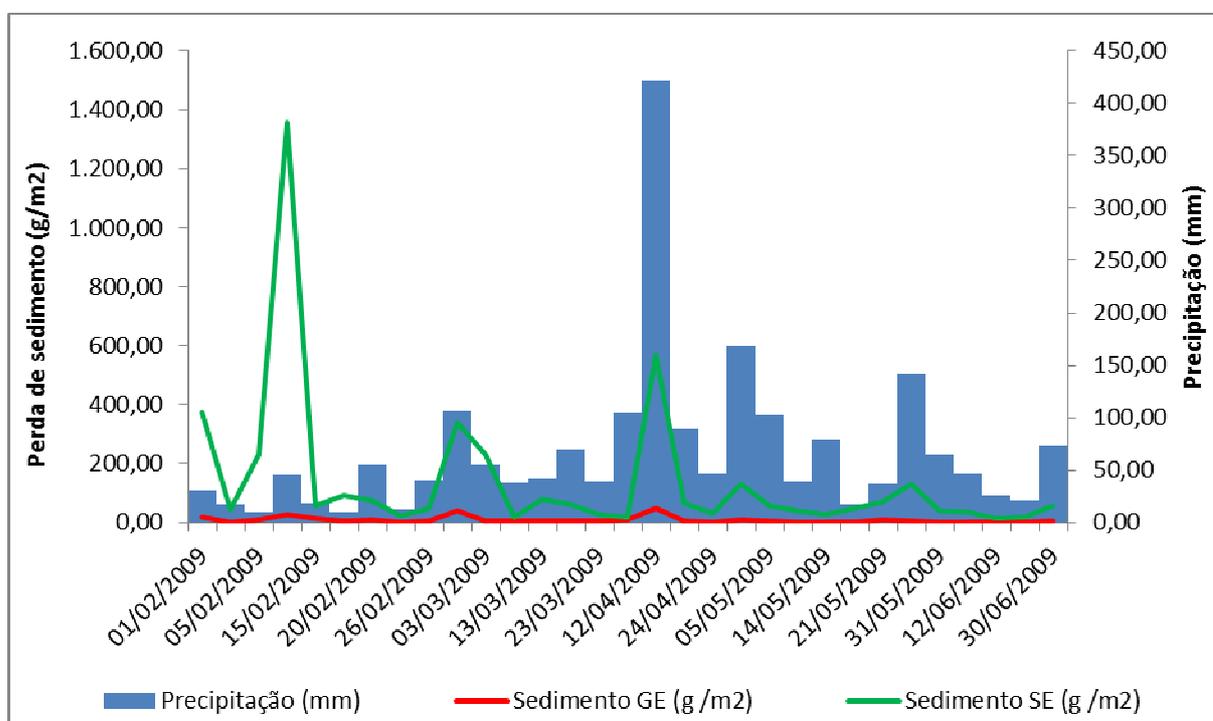


Figura 91 – Variação temporal da perda de sedimentos na estação experimental. GE

= Geotêxteis com gramíneas; SE = Solo exposto.

Os resultados alcançados por Bhattacharyya *et al.* (2009) na estação experimental Hilton, na Inglaterra mostraram que:

Durante o período de monitoramento, as parcelas com gramíneas obtiveram os menores valores totais de escoamento superficial (...). Foi observado que durante 18/06/07 a 25/06/07, com um total de precipitação de 115 mm, a perda de solo da parcela com solo exposto alcançou  $\sim 2.1 \text{ kg m}^{-2}$ . Durante esta semana, a perda de sedimentos da parcela com  $1 \text{ m}^2$  (Buffer) de geotêxteis de Borassus teve  $\sim 0.15 \text{ kg m}^{-2}$ , quando comparada com apenas  $\sim 0.02 \text{ kg m}^{-2}$  da parcela com  $1 \text{ m}^2$  da parcela com geotêxteis de buriti (BHATTACHARYYA *et al.*, 2009).

Tabela 19 – Valores mensais de escoamento superficial e perda de sedimentos na estação experimental.

Meses	Precipitação (mm)	Escoamento GE ( $\text{L m}^{-2}$ )	Sedimento GE ( $\text{g m}^{-2}$ )	Escoamento SE ( $\text{L m}^{-2}$ )	Sedimento SE ( $\text{g m}^{-2}$ )
Fevereiro	345,00	49,08	127,90	108,88	2.636,11
Março	244,10	26,91	23,84	59,65	408,44
Abril	661,65	36,05	63,59	84,82	678,30
Mai	650,00	70,86	31,81	169,57	545,13
Junho	166,75	25,67	8,71	71,72	122,97
<b>Totais</b>	<b>2.067,50</b>	<b>208,57</b>	<b>255,85</b>	<b>494,63</b>	<b>4.390,96</b>

GE = Geotêxteis com gramíneas; SE = Solo exposto. Autoria: Bezerra, 2009.

As propriedades dos solos, como a densidade aparente, porosidade, quantidade de matéria orgânica e a granulometria dos solos, aliada à alta erosividade da região, podem ser a explicação para essa grande diferença entre as parcelas. Sobre as propriedades físicas dos solos da voçoroca do Coeduc, Sathler (2010) descreveu suas principais características:

A feição erosiva do Coeduc foi bastante homogênea, apresentando em todos os perfis a predominância de camadas areno-siltosas avermelhadas, porosas, com estrutura granular e fraca coesão. Quanto ao limite de consistência, apenas 4 amostras (de um total de 24 amostras) foram medianamente plásticas, correspondendo às camadas mais argilosas da cabeceira e da lateral, todas classificadas como inativas. A resistência à penetração foi de 0,23 MPa em amostra pedregosa com gramíneas e 0,78 MPa em terreno arenoso compactado sem vegetação (SATHLER, 2010).

Pereira (2006) analisando as fácies arenosas da Formação Barreiras em topo de tabuleiro das proximidades do reservatório do Batatã, Ilha do Maranhão, demonstrou que:

Esta unidade representa os altos topográficos, com altitudes que variam de 45 a 60 metros, pertencente à Formação Barreiras. O topo dos tabuleiros é plano (0 - 2 %) constitui-se de areia fina, creme a avermelhada-alaranjada, bem selecionada, quartzosa, de consistência média a baixa. Apresenta intercalações de concreções lateríticas. Os tabuleiros e vertentes apresentam, geralmente, solos profundos, em média com 1 a 2 metros, caracterizados por argissolos e às vezes, neossolos. A profundidade do nível estático é variável, entre 7 e 21 metros, com oscilações durante o período de estiagem. Os problemas registrados na área são a alta suscetibilidade à erosão e rastejo. Registra-se a ocorrência de retirada ilegal de areia e lateritas para utilização em obras da construção civil (PEREIRA, 2006).

Ao longo dos cinco meses de monitoramento foi possível analisar as variações do escoamento superficial de perda de sedimentos na estação experimental. O maior índice pluviométrico registrado foi no mês de abril com 661,65 mm de chuvas, gerando fluxo superficial de 36,05 L m<sup>-2</sup> e perda de 63,59 g m<sup>-2</sup> na parcela com geotêxteis e gramíneas, enquanto na parcela com solo exposto gerou escoamento de 84,82 L m<sup>-2</sup> e material transportado de 678,30 g m<sup>-2</sup>. As menores taxas de chuva no experimento foram no mês de junho com 166,75 mm, gerando um fluxo superficial de 25,67 L m<sup>-2</sup> e 8,71 g m<sup>-2</sup> de sedimentos transportados. Na parcela com superfície exposta, obteve-se um escoamento total de 71,72 L m<sup>-2</sup>, com uma perda de sedimentos de 122,97 g m<sup>-2</sup> (Figuras 90, 91, tabela 19).

Bezerra (2006), estudando estação experimental na região dos Cerrados demonstrou que:

O maior valor mensal de chuvas foi registrado no mês de março com 306,6 mm, influenciando diretamente os resultados do escoamento superficial e a remoção de sedimentos na estação experimental. Aliada a uma considerável frequência e magnitude dos eventos chuvosos, a formação de crostas superficiais implicaram no decréscimo da infiltração e conseqüentemente no aumento do fluxo

superficial (795,9 l), o maior registrado no estudo, com uma perda de 52.350,42 g (BEZERRA, 2006).

Os maiores escoamentos superficiais observados nas parcelas com geotêxteis e solo exposto foram no mês de maio com 70,86 L m<sup>-2</sup> (31,81 g m<sup>-2</sup>) e 169,57 L m<sup>-2</sup> (545,13 g m<sup>-2</sup>) respectivamente. As perdas de solos mais elevadas foram registradas no mês de fevereiro com 127,90 g m<sup>-2</sup> (49,08 L m<sup>-2</sup>) na parcela com geotêxteis e gramíneas, e 2.636,11 g m<sup>-2</sup> (108,88 L m<sup>-2</sup>) no solo exposto (Figuras 90, 91, tabela 19).

Os maiores valores de escoamento superficial e perda de sedimentos obtidos por Bezerra (2006), para estudo em Uberlândia (MG) foram:

O mês de dezembro obteve o segundo maior índice pluviométrico de todo o período estudado atingindo 279,89 mm de chuvas. Na primeira metade do mês essas chuvas atingiram os geotêxteis diretamente, pois a vegetação ainda não estava desenvolvida, reforçando sua função protetora do solo. Nesse mês, o escoamento superficial na parcela com os geotêxteis chegou a 379,8 L (maior valor), enquanto no solo exposto o fluxo registrado foi quase o dobro (752,2 L – 2º maior valor registrado). Os maiores valores de perda de sedimentos foram obtidos nesse mês, chegando a 64.971,93 g na parcela com superfície exposta e 5.503,05 g, na parcela com geotêxteis e gramíneas (BEZERRA, 2006).

A acentuada diferença de perda de sedimentos no mês de fevereiro, quando comparado aos outros meses de monitoramento, decorre pelo fato de ser tratar do início da estação chuvosa da região Norte do Estado do Maranhão, como também maior evaporação na superfície o que pode ter ocasionado a instabilidade dos agregados e, conseqüentemente, menor coesão das partículas e predisposição ao transporte.

A parcela com solo exposto sofreu com o efeito *splash*, formando crostas superficiais que diminuíram, teoricamente, a infiltração, aumentando as taxas do

fluxo superficial, e conseqüentemente, o transporte de sedimentos. Sobre as taxas de infiltração da voçoroca do Sacavém (Figura 92), Mendonça (2003) afirmou que:

O constante desmatamento e a queima da vegetação da área expõe o solo ao impacto direto das gotas da chuva, causando o processo de encrostamento, tendo como conseqüência baixas taxas de infiltração e o aumento do escoamento superficial favorecendo a evolução da erosão, o que foi comprovado através dos ensaios com o infiltrômetro realizados nas cabeceiras das voçorocas, durante o período seco, para que a umidade antecedente do solo não influenciasse nos resultados (MENDONÇA, 2003).

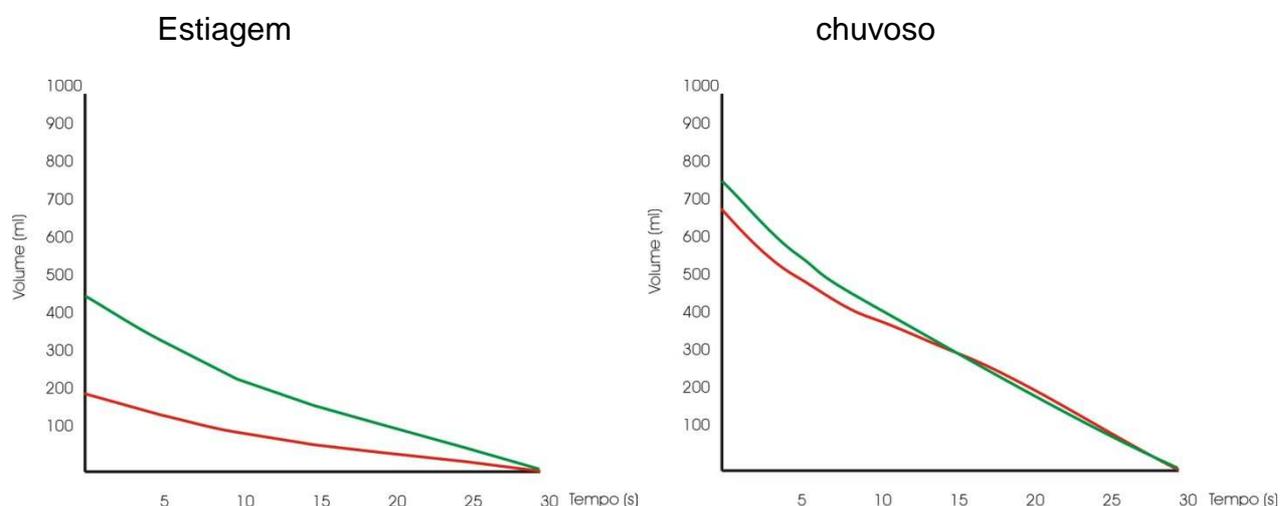


Figura 92 - Taxas de infiltração da voçoroca do Sacavém nos períodos de estiagem e chuvoso. Fonte: Mendonça, 2003.

Os geotêxteis biodegradáveis conseguem absorver a umidade do solo e das chuvas, servindo também como obstáculo na geração do fluxo superficial e ancoramento das sementes e sedimentos, o que foi observado a partir dos dados coletados. Ressalta-se também que no mês de fevereiro, as chuvas atingiram diretamente os geotêxteis, pois a cobertura de gramíneas estava iniciando seu processo de desenvolvimento, o que reforça a sua função de proteção da superfície, diminuindo a energia cinética das chuvas, dificultando a movimentação das partículas soltas responsáveis pela selagem do solo (Figuras 93, 94).



Figura 93 – Diferenças no efeito *splash* nas parcelas com geotêxteis e solo exposto no início do monitoramento da estação experimental. Foto: Bezerra, 2009.



Figura 94 – Sedimento transportado para o galão da parcela com solo exposto b. Foto: Bezerra, 2009.

Sobre a retenção da umidade do solo com geotêxteis de fibra de coco em Kerala na Índia, Lekha (2003), considerando as condições do ponto de murcha permanente e capacidade de campo, afirmou que:

Em ambas as condições, tanto ponto de murcha permanente, como capacidade de campo, a retenção da umidade do solo foi mais elevada na parcela com proteção do que a parcela com superfície exposta. Foi observado que no período pré-monçônico (período seco), a retenção da umidade do solo na parcela com os geotêxteis de fibra de coco foi aumentando a 13% em 0,3 bar e 22% em 15 bar. Assim, a disponibilidade de água foi bem maior nas parcelas com proteção. Isso ocorreu devido às características de absorção da fibra do coco, e da redução das taxas de erosão (LEKHA, 2003).

Sobre a variação da umidade superficial com sonda TDR (*Time Domain Reflectometry*) em parcelas com solo exposto e geotêxteis com gramíneas, Bezerra (2006) chegou aos seguintes resultados:

Na parcela com solo exposto, os valores de umidade superficial variaram de 6,8% no dia 21 de dezembro de 2006, com 6 mm de chuvas a 17,6 % no dia 24 de novembro, com 51,1 mm de precipitação. Na parcela com geotêxteis, os dados de umidade na primeira etapa chegaram a uma amplitude entre 10,3% no dia 21 de dezembro de 2005, com 6 mm de chuva registrado e 24,1% no dia 08 de dezembro de 2005 com 32 mm de chuva no dia do monitoramento (BEZERRA, 2006).

A análise descritiva dos dados demonstrou uma diferença entre as parcelas com geotêxteis (GE) e solo exposto (SE) (Tabela 20), no que se refere ao escoamento superficial e produção de sedimentos. As médias do fluxo superficial durante o monitoramento foram  $6,73 \text{ L m}^{-2}$  na parcela com geotêxteis e  $15,96 \text{ L m}^{-2}$  na parcela com solo exposto (Tabela 20). Enquanto as médias de perda de sedimentos foram  $8,25 \text{ g m}^{-2}$  na parcela com geotêxteis de buriti e  $141,64 \text{ g m}^{-2}$  no experimento com superfície exposta (Tabela 20). Observa-se pelos dados apresentados a grande diferença entre as duas parcelas, o que demonstrou a eficiência dos geotêxteis na redução do escoamento superficial e no ancoramento dos sedimentos (Figuras 95, 96).



Figura 95 – Sedimentos depositados na calha da parcela com solo exposto.

Foto: Bezerra, 2009.



Figura 96 – Sedimentos depositados na calha da parcela com geotêxteis.

Foto: Bezerra, 2009.

Tabela 20 – Síntese da estatística descritiva.

Escoamento superficial								
Parcelas	Total (L m <sup>-2</sup> )	Média (L m <sup>-2</sup> )	Máx (L m <sup>-2</sup> )	Mín (L m <sup>-2</sup> )	DV (L m <sup>-2</sup> )	CES (%)	RES (%)	n
<b>Geotêxteis</b>	208,57	6,73	14,25	0,95	3,22	15,45	58,30	62
<b>Solo Exposto</b>	494,63	15,96	30,00	5,83	6,49	38,39		62
Perda de sedimentos								
Parcelas	Total (g m <sup>-2</sup> )	Média (g m <sup>-2</sup> )	Máx (g m <sup>-2</sup> )	Mín (g m <sup>-2</sup> )	DV (g m <sup>-2</sup> )	RPS (%)	n	
<b>Geotêxteis</b>	225,85	8,25	46,95	0,43	10,68	90,15	62	
<b>Solo Exposto</b>	4.390,96	141,64	1.358,14	15,46	258,03		62	

CES = Coeficiente de escoamento superficial

Autoria: Bezerra, 2009.

RES = Eficiência na redução do escoamento superficial

RPS = Eficiência na redução da produção de sedimentos

Considerando os valores mensais de fluxo superficial e taxa de erosão no experimento, foram calculados o coeficiente de escoamento superficial (CES), a eficiência dos geotêxteis na redução do escoamento superficial (RES), e a eficiência dos geotêxteis na redução da produção de sedimentos (RPS), baseados nos trabalhos de Sutherland (1998). Com esses cálculos foi possível fazer um estudo comparativo sobre a eficiência dos geotêxteis construídas com fibra de buriti com outras pesquisas.

O coeficiente de escoamento superficial (CES) chegou a 38,39 % (SE) e a 15,45% (GE), indicando a importância de uma cobertura no solo na diminuição do fluxo superficial. Os valores de escoamento (L m<sup>-2</sup>) e perda de solos (g m<sup>-2</sup>) foram transformados logaritmicamente para poderem ser diferenciados e visualizados nos gráficos (Figura 97). Estatisticamente a diferença desses parâmetros entre as parcelas com solo exposto (SE) e geotêxteis com cobertura vegetal (GE) foram significativas no teste de Mann-Whitney ( $P < 0,001$ ) (SMETS *et al.*, 2008; GUERRA *et al.*, 2009; SMETS & POESEN, 2009; BHATTACHARYYA *et al.*, 2009, 2010).

No tocante a eficiência dos geotêxteis na redução do escoamento superficial (RES) e na sua eficiência na redução da produção de sedimentos (RPS), estas atingiram as taxas de 58,30% e 90,15% respectivamente. Esses resultados demonstraram que os geotêxteis de fibra de buriti foram eficientes na redução do fluxo superficial (Figura 98) e transporte de sedimentos, quando comparados com outras pesquisas com diferentes geotêxteis (SMETS *et al.*, 2008; SMETS & POESEN, 2009; BHATTACHARYYA *et al.*, 2009, 2010).

Os resultados obtidos por Bhattacharyya (2010), durante o período de monitoramento em Hilton (Inglaterra), demonstraram que as parcelas com gramíneas atingiram os menores valores de escoamento superficial e as maiores taxas de redução do escoamento superficial (RES), quando comparada com os outros experimentos. As parcelas sem proteção atingiram os valores mais elevados do coeficiente de escoamento superficial (CES). As parcelas com solo exposto e com geotêxteis (produzidas a partir da palmeira *Borassus*) obtiveram 75% e 32% maiores fluxos superficiais que as parcelas com gramíneas. Em relação à eficiência dos geotêxteis na redução da produção de sedimentos (RPS) para as parcelas com *Borassus* e Buriti, estas alcançaram 92% e 97% respectivamente (BHATTACHARYYA, 2010).

Lekha (2004), analisando a eficiência de geotêxteis de fibra de côco na redução da erosão em Kerala na Índia, afirmou que:

Foi observado que a erosão na parcela com proteção obteve uma redução de 99,6% durante a pré-moção, 95,7% na moção e 78,1% na pós-moção, quando comparada na parcela sem proteção. Este é um claro indicador que esta técnica foi extremamente eficiente na redução das taxas de erosão em terrenos colinosos degradados (LEKHA, 2004).

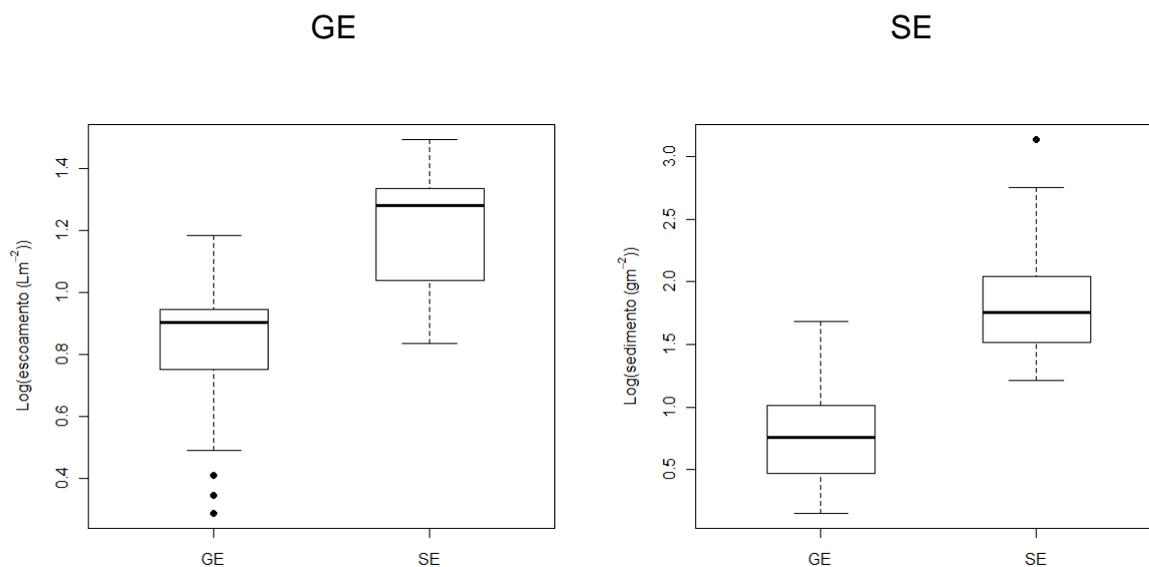


Figura 97 – Diferença na geração do escoamento superficial e perda de sedimentos entre as parcelas com geotêxteis com gramíneas (GE) e solo exposto (SE). As diferenças foram significativas no teste de Mann-Whitney ( $P < 0,001$ ).

Autoria: Bezerra, 2011.



Figura 98 – Diferenças na geração do escoamento superficial nas parcelas com geotêxteis com gramíneas e solo exposto. Foto: Bezerra, 2009.

As correlações entre os eventos pluviométricos e a geração do escoamento superficial foram consideradas significativas nas duas parcelas (GE =  $P < 0,01$ ; SE =  $P < 0,001$ ). O volume do escoamento superficial por unidade de área aumentou significativamente ( $P < 0,01$ ), com o aumento da precipitação numa taxa de  $0,0015 \text{ L m}^{-2} \text{ mm}^{-1}$  na parcela com geotêxteis com gramíneas, enquanto na parcela com solo exposto o fluxo superficial ( $\text{m}^2$ ) aumentou significativamente ( $P < 0,001$ ) com o aumento da precipitação numa taxa de  $0,0013 \text{ L m}^{-2} \text{ mm}^{-1}$  (Figura 99).

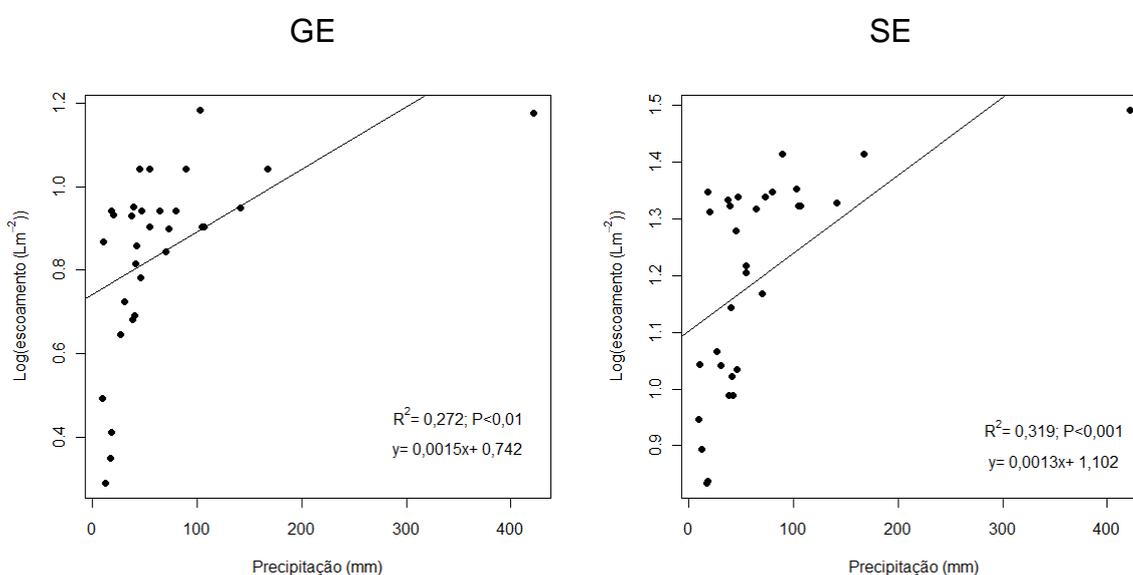


Figura 99 - Correlação entre precipitação e escoamento superficial.  
Foto: Bezerra, 2011.

As relações entre os índices pluviométricos e a produção de sedimentos demonstraram também diferenças significativas nas parcelas GE ( $P < 0,01$ ) e SE ( $P < 0,05$ ). No sistema com geotêxteis e gramíneas, a produção de sedimentos em unidade de área ( $\text{m}^2$ ) cresceu significativamente ( $P < 0,01$ ) com o aumento da precipitação numa taxa de  $0,0024 \text{ g m}^{-2} \text{ mm}^{-1}$ . As taxas de perda de solos por unidade de área na parcela sem proteção aumentou significativamente ( $P < 0,05$ ) com o acréscimo da precipitação no valor de  $0,0024 \text{ g m}^{-2} \text{ mm}^{-1}$  (Figura 100) (AHN *et al.*, 2002; VACCA *et al.*, 2000; SMETS *et al.*, 2009).

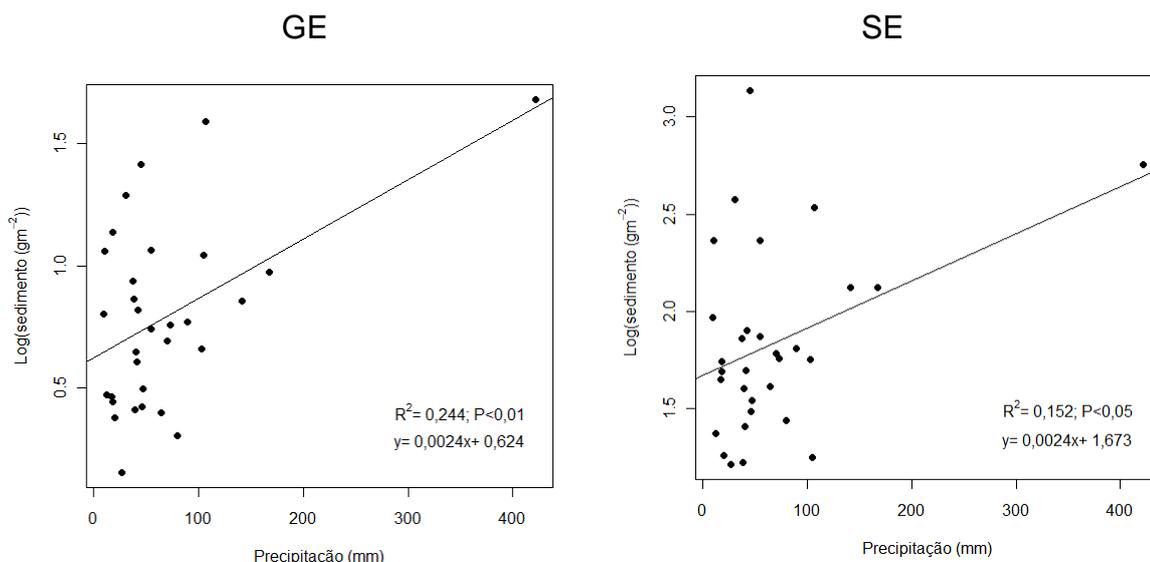


Figura 100 – Correlação entre precipitação e perda de sedimentos.  
 Autoria: Bezerra, 2011.

No que se refere à correlação entre a geração do escoamento superficial e a perda de sedimentos, as diferenças não foram significativas em ambos os sistemas GE ( $P > 0,05$ ) e SE ( $P > 0,05$ ), sendo que a perda de sedimentos por unidade de área ( $m^2$ ) aumentou com o acréscimo do fluxo superficial em  $0,418 \text{ g } m^{-2} \text{ L } m^{-2}$  e  $0,522 \text{ g } m^{-2} \text{ L } m^{-2}$  respectivamente (Figura 101). Esses resultados reforçam a necessidade da aplicação da bioengenharia de solos na reabilitação de áreas degradadas (DESCHEEMAEKER *et al.*, 2006; SMETS *et al.*, 2009; FATAHIA *et al.*, 2010).

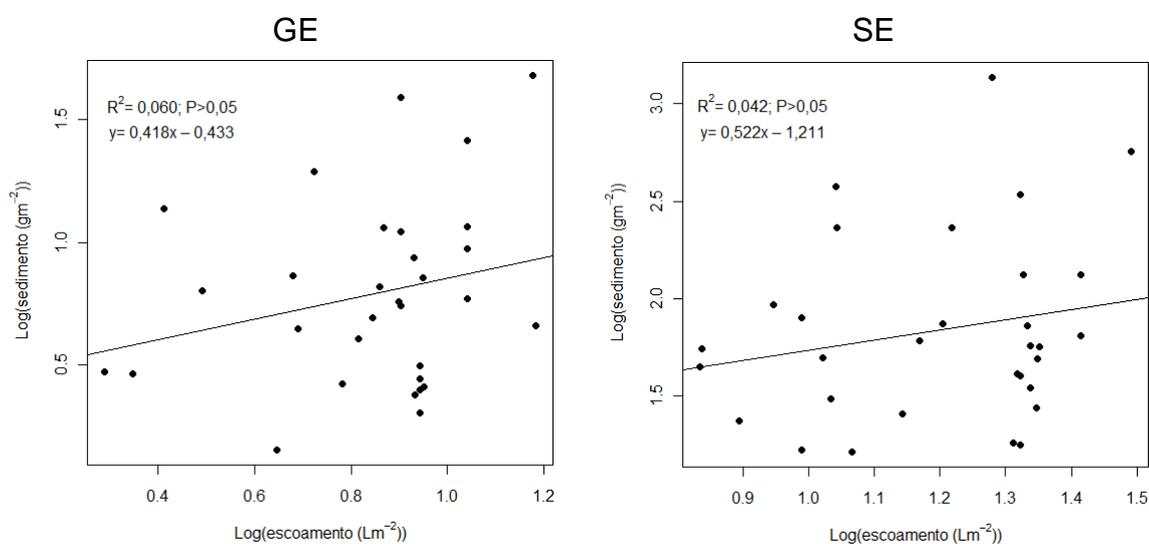


Figura 101 - Correlação entre escoamento e perda de sedimentos.  
 Foto: Bezerra, 2011.

### 7.7 Exemplo de caso: Reabilitação de áreas degradadas com técnica de bioengenharia de solos na voçoroca do Sacavém - São Luís – MA

Dos agentes causadores dos processos erosivos em São Luís, foram observadas as ações conjugadas de diversos agentes, predominando a ação da chuva, dos ventos, e ação antrópica sobre uma formação sedimentar mal consolidada e friável, como no caso das formações Barreira e Itapecuru (FEITOSA 1989, 1996; MARANHÃO, 1998). Os eventos pluviométricos na porção Norte do Estado do Maranhão, que são caracterizados como alta erosividade, influenciam o início e desenvolvimento de voçorocamento por toda Ilha do Maranhão. Os limites dos índices pluviométricos ultrapassam os 2.000 mm/ano segundo os dados dos períodos de 1971 a 1998, 2003 a 2008 (Figura 102). A análise desse período demonstrou que as maiores precipitações estão concentradas entre os meses de janeiro a junho, com maiores índices entre os meses de março e abril (Figura 103), ocorrendo chuvas diárias que ultrapassam os 180 mm.

Quanto à ação dos agentes pluviométricos, percebeu-se a atuação de vários mecanismos que originam diferentes feições erosivas, que ocorrem nas voçorocas, tais como: pedestais, alcovas, sulcos, filetes, dutos, marmitas, quedas de areia, quedas de torrões, costelas, fendas, movimentos de massa, entre outros, descritos por Oliveira (1999), Guerra (1990, 1996, 1999 e 2003), Morgan (1981, 1995 e 2001).

Pereira *et al.* (2001) estudando os processos erosivos nas áreas urbanas e costeiras da Ilha do Maranhão, consideraram que:

Os estudos dos processos erosivos nas áreas enfocadas sugerem uma dinâmica ativa envolvendo em sinergia vários fatores conjugados como o elevado índice pluviométrico presente na área, associado a morfologia do terreno que contribui para que áreas mais baixas receba fluxos concentrados de água. Além dos processos erosivos atuarem intensamente nos sedimentos silticos-argilosos que auxiliarão no desenvolvimento das voçorocas (PEREIRA *et al.*, 2001).

Estudos realizados por Bacellar & Drumond (2006) sobre a caracterização hidrossedimentológica e dos processos evolutivos de voçoroca em área de rochas gnáissicas do Alto Rio das Velhas (MG), concluíram que:

A taxa média de recuo de borda da voçoroca na estação chuvosa (de 22/01 a 22/04/06) foi de 0,58 cm/dia, enquanto que na estação seca (de 20/08 a 21/11), de apenas 0,02 cm/dia, com recuos mais expressivos registrados nas cabeceiras da voçoroca. O peso de sedimentos transportados pelo sistema de drenagem da voçoroca varia muito ao longo do ano, atingindo 104 kg/mês, no verão, e 13 kg/mês no inverno. O peso de sedimentos se correlaciona melhor com a pluviosidade que com a vazão, já que esta sofre influência do fluxo de base, de baixa erosividade (BACELLAR & DRUMOND, 2006).

Oliveira *et al.* (2007) investigando os índices pluviométricos e o processo de degradação ambiental por voçorocas no município de Camaragibe-PE, afirmaram que:

Os diferentes pontos monitorados da voçoroca tiveram uma evolução relativamente acentuada, ou seja, o processo erosivo atuou de forma decisiva e possibilitou a conseqüente evolução da voçoroca. Essa evolução se fez mais acentuada nos meses de maio e junho de 2005, quando seus índices pluviométricos atingiram 472 mm e 746,9 mm respectivamente, para o ano de 2006, os índices pluviométricos foram processados com baixa representatividade (OLIVEIRA *et al.*, 2007).

Os resultados obtidos por outros estudos demonstraram a importância da análise temporal dos índices pluviométricos na aceleração dos processos de voçorocamento.

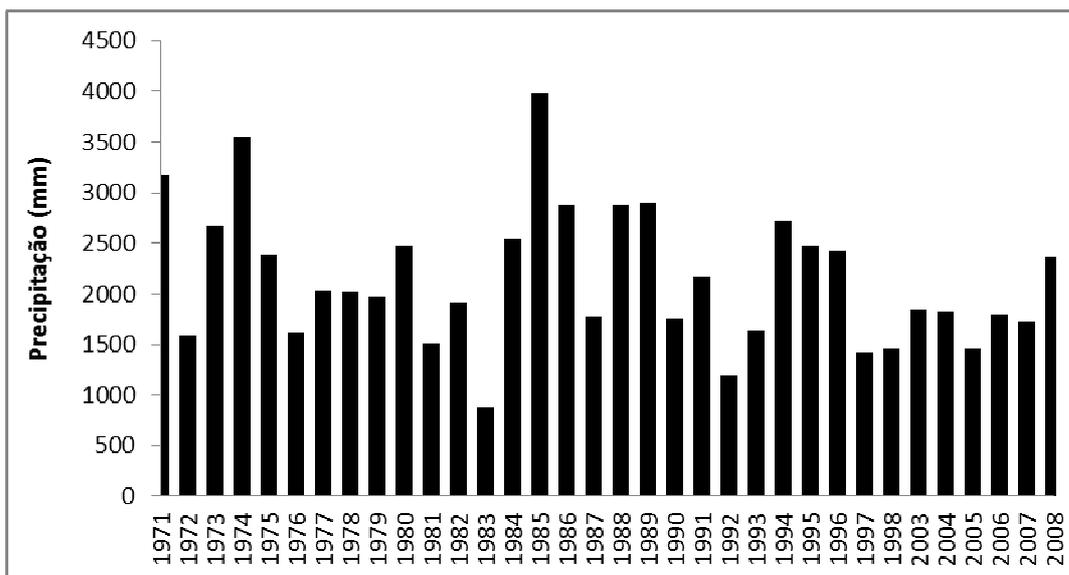


Figura 102 – Pluviosidade total anual em São Luís no período de 1971 a 1998, 2003 a 2008. Fonte: Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica – DNAE; Laboratório Meteorológico da Universidade Estadual do Maranhão; SUDENE (Superintendência de Desenvolvimento do Nordeste).

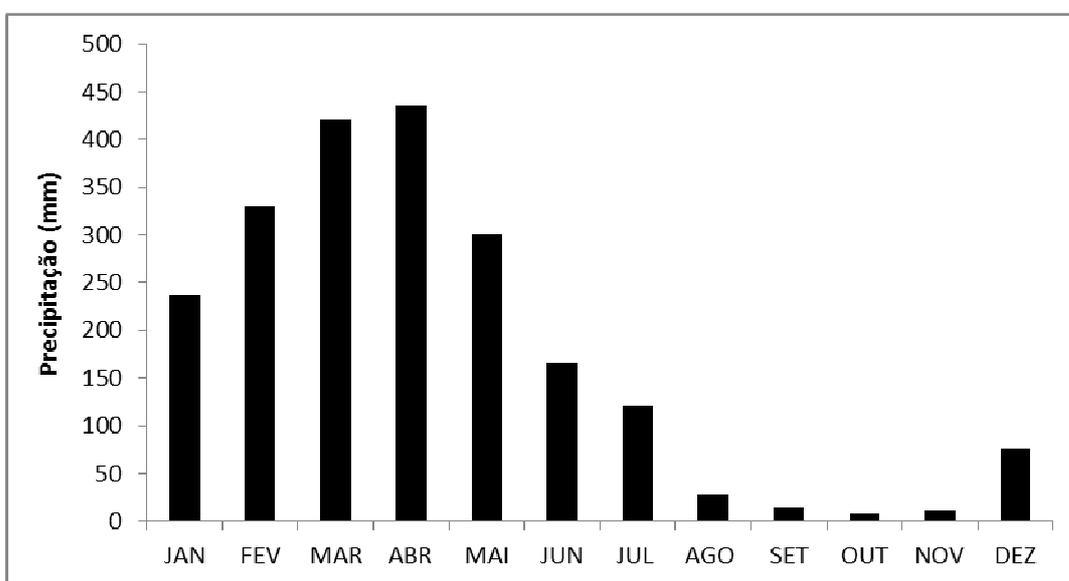


Figura 103 – Média mensal das chuvas em São Luís no período de 1971 a 1998, 2003 a 2008. Fonte: Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica – DNAE; Laboratório Meteorológico da Universidade Estadual do Maranhão; SUDENE (Superintendência de Desenvolvimento do Nordeste).

A voçoroca do Sacavém (Figura 104) localiza-se na porção centro-oeste do município de São Luís, mais especificamente no bairro do Sacavém. Essa feição está disposta na cabeceira de drenagem na margem direita do rio das Bicas que compõe a bacia do Bacanga, possuindo ~35 m de comprimento e ~75 m de largura. A área apresenta afloramentos da Formação Barreiras, com encostas íngremes e pouca vegetação (floresta secundária mista e capoeira), com intensa atividade de extração mineral, inclusive pela própria população local.

A análise dos dados de monitoramento das cabeceiras da voçoroca do Sacavém revelou pouca evolução durante quatro anos de monitoramento, porém a remoção de suas bases é causada pela extração ilegal, principalmente de areia fina, utilizada para a construção civil. Os maiores recuos observados foram nas estacas 10 e 13 (Tabela 21, figura 105), que ocorreram devido aos pequenos movimentos de massa, principalmente nas cabeceiras com alto grau de compactação e incipiente cobertura vegetal. A evolução desses processos pode colocar em risco as torres de transmissão de energia da ELETRONORTE e as residências circunvizinhas.

Estudos de Silveira *et al.* (2006) sobre evolução de cabeceiras com estacas da voçoroca Ribeirão da Cachorra em Paraíso do Tocantins, demonstraram que:

As taxas de avanço das cabeceiras e bordas medidas são desiguais demonstrando uma evolução não uniforme. A perda de solo das bordas está sendo superior às da cabeceira. Fato comprovado pelo piquete de número 10 onde se observa um avanço de 95 centímetros para a estação chuvosa estudada, seguido pelo piquete 15 com 57 centímetros, mas a maioria dos piquetes não apresentou aumento significativo, não se constatando avanço. O fato de na região predominar chuvas intensas em um intervalo curto de tempo, contribui de forma bastante significativa para a evolução das bordas e cabeceiras, que compreende dos meses de novembro a maio (SILVEIRA *et al.*, 2006).



Figura 104 – Vista parcial da voçoroca do Sacavém.

Foto: Bezerra, 2008.

Tabela 21 – Dados do monitoramento da voçoroca do Sacavém.

LOCALIZAÇÃO		MEDIDAS						
ESTACAS	Rumo	1º 26.12.00	2º 05.04.01	3º 20.07.01	4º 18.03.02	5º 16.09.02	6º 04.10.03	7º 20.03.04
Estaca 10	188º	13,50	13,40	13,17	13,10	13,05	13,03	13,03
	192º	13,40	13,40	12,58	11,56	11,50	11,50	11,49
	203º	11,03	11,00	9,55	9,54	9,54	9,52	9,52
Estaca 11	191º	14,85	14,14	13,58	13,56	13,40	13,35	13,32
	196º	13,93	13,65	13,33	13,16	13,16	13,14	13,10
	205º	14,35	13,45	13,29	13,25	13,00	13,00	12,58
Estaca 12	195º	17,15	16,78	16,60	16,60	16,60	16,57	16,57
	208º	19,30	18,00	17,95	17,20	17,20	17,18	17,15
	224º	19,80	19,37	19,28	19,13	18,60	18,55	18,55
Estaca 13	200º	19,35	18,80	18,70	17,90	17,90	17,87	17,87
	240º	7,63	7,22	7,10	7,03	7,00	6,56	5,54
	250º	13,40	12,80	12,50	12,45	9,50	9,30	9,28

Fonte: Mendonça, 2004.

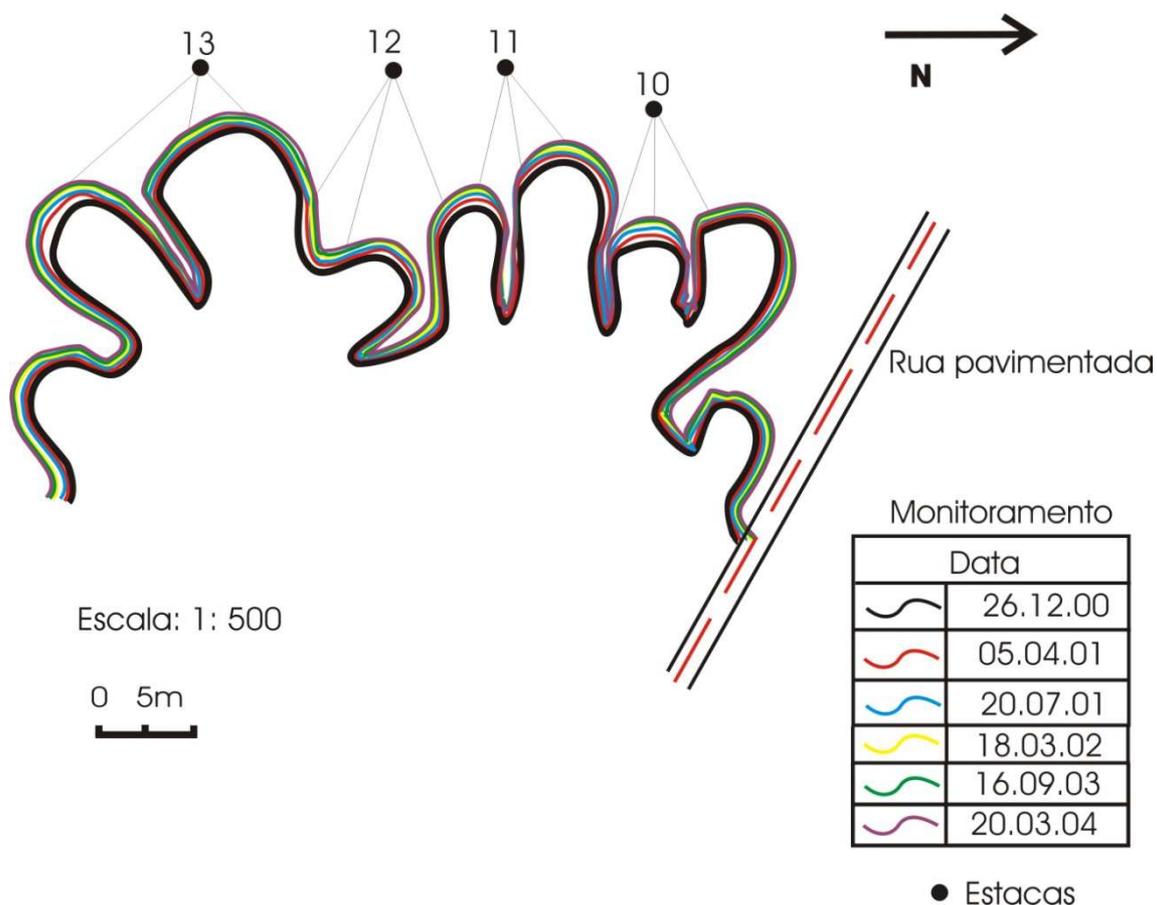


Figura 105 – Croqui da voçoroca do Sacavém.

Fonte: Mendonça, 2004.

Francisco & Nunes (2009) investigaram os processos de voçorocamento no município de Rancharia (SP) com método de estacas e concluíram que:

Através do monitoramento realizado no período de 12 meses constatou-se a ação do processo de ravinamento nas bordas da voçoroca, mesmo nos períodos com ausência de precipitações concentradas, devido à atuação das águas de infiltração pelo escoamento de subsuperfície, em destaque para o mês de julho de 2007, que apresentou precipitações bem acima da média histórica. As estacas que apresentaram as maiores taxas de perda de solo foram as de número 01 e 09 por estarem localizados nos divisores das ravinas e as estacas 11 e 12 devido à proximidade com o escoamento de subsuperfície que solapa a base dos taludes da ravina de número 3 (FRANCISCO & NUNES, 2009).

Quanto ao uso da terra nas áreas circunvizinhas da voçoroca do Sacavém foram identificadas as categorias como área urbanizada e aproveitamento econômico. A categoria área urbanizada se caracteriza por espaços com intensa ocupação populacional, predominando usos residenciais padronizados, ou áreas residenciais consolidadas e áreas com atividades terciárias (MARANHÃO, 1998). Esta categoria está mais evidenciada nas proximidades da feição erosiva, o que pode acarretar perdas materiais e humanas em face do maior potencial de risco ambiental.

A categoria de uso aproveitamento econômico relaciona-se com as atividades basicamente ligadas ao setor primário, tais como: granjas, áreas de empréstimo de material para construção civil e estabelecimentos agropecuários (MARANHÃO, 1998). Na voçoroca do Sacavém, essa categoria está representada essencialmente pela extração mineral, com prejuízos sócio-econômicos e ambientais, sendo realizada pela comunidade para construção/reforma das moradias, bem como pelas indústrias da construção civil do município de São Luís.

Ambas as categorias de uso da terra estão intrinsecamente relacionadas com o aparecimento e aceleração dos processos erosivos locais. Na área urbanizada, a partir da impermeabilização do solo, ocorre a diminuição das taxas de infiltração o que contribui para o início de processos erosivos nas áreas desprovidas de vegetação.

A categoria aproveitamento econômico, em que se destaca a extração de silte e argila, caracteriza-se pela retirada desses minerais da base da voçoroca. A constante extração dos minerais nas bases das feições erosivas ocasiona o colapso dos blocos adjacentes, interferindo diretamente na evolução dos processos erosivos, além de apresentar risco potencial para os habitantes da localidade.

Sobre a intervenção antrópica, Ferreira (2005), fez uma relação entre a construção de estradas e processos de voçorocamento no município de Nazareno, MG, concluindo que:

Os fatores antrópicos potencializam o crescimento de todas as voçorocas amostradas e podem estar relacionados com as suas prováveis origens. As estradas rurais construídas nas décadas de 1950 e 1960 recebiam tráfego de veículos com tração animal que compactavam bastante o solo devido à pequena espessura das rodas de madeira. Isto causava o aprofundamento do leito das estradas, formando assim as cavas que chegavam a atingir mais de dez metros de profundidade. Essas cavas eram construídas sem nenhum planejamento conservacionista e seus traçados eram no sentido perpendicular das encostas. Por isso 64% das voçorocas amostradas tiveram suas origens relacionadas com as estradas antigas. Com a formação das voçorocas, as estradas eram realocadas para áreas adjacentes, iniciando novamente o processo de formação de cavas e provocando um alargamento das voçorocas (FERREIRA, 2005).

Carvalho *et al.* (2009) relacionou os processos de extração de areia com o aparecimento de processos erosivos no açude Bodocongó em Campina Grande (PB) afirmaram que:

A extração mineral é caracterizada pela retirada de areia para a construção civil, ao longo dos taludes do açude. Os efeitos negativos provenientes desta atividade, além de comprometerem a sua infraestrutura, pela extração de areia e pela supressão dos vegetais que protegem os taludes, são sinérgicos e se traduzem em processos erosivos (sulcos, ravinas), assoreamento do açude, aumento da turbidez, dentre outros (CARVALHO *et al.*, 2009).

Em relação ao início dos processos erosivos acelerados em áreas urbanas, Suriani *et al.* (2009), analisando a microbacia hidrográfica do córrego Taipús, município de Adamantina – SP, encontraram os seguintes resultados:

As voçorocas que se desenvolvem na área urbana estão ligadas diretamente ao lançamento de águas de chuva ou através do arruamento. A necessidade de lançamento das águas pluviais e servidas em drenagens próximas às zonas urbanas, que não comportam um grande incremento de vazão, aumentando significativamente o pico de enchente, a microbacia vai sofrendo um rápido processo de entalhamento e alargamento do leito (SURIANI *et al.*, 2009).

A voçoroca apresenta taludes íngremes, chegando até 90°, necessitando de intervenção para aplicação das técnicas de bioengenharia de solos, tendo sido selecionado um trecho da voçoroca com 2.000 m<sup>2</sup> para a reabilitação, com utilização da técnica proposta. O conhecimento geomorfológico da área, relacionado aos caminhos preferenciais do escoamento superficial sobre o solo foi imprescindível.

A reabilitação da área degradada por voçorocamento com técnica de bioengenharia de solos foi dividida em três etapas: reconstrução dos taludes; aplicação dos insumos e geotêxteis; e manutenção das obras. A reconstrução dos taludes da voçoroca foi executada a partir da utilização de uma retroescavadeira e manualmente pelos trabalhadores contratados, resultando em diferentes declividades e comprimentos de encostas com as seguintes características (Figura 106): Ponto A = 28° e 4 m; Ponto B = 33° e 6,5 m; Ponto C = 25° e 2,80 m; Ponto D = 24° e 2,60 m; Ponto E = 28° e 3,4 m; Ponto F: 40° e 6 m.

Os taludes foram reconstruídos com o objetivo de diminuir a alta declividade, que em alguns pontos chegavam até 90°, como também diminuir o comprimento da rampa, evitando a formação e o aumento da velocidade do escoamento superficial. No final das rampas foram fixadas paliçadas de madeira para ancorar o material inconsolidado e o substrato de adubo de palmeiras. As paliçadas também foram colocadas acima das rampas reconstruídas, servindo como quebra da velocidade do escoamento superficial. A drenagem foi feita com sacos de estopa preenchidos com areia do próprio local, sementes de braquiária e adubo de palmeiras.

Andrade *et al.* (2005) utilizaram práticas mecânicas e vegetativas para controle na voçoroca do Morro do Radar no Aeroporto Internacional do Rio de Janeiro Galeão/Antonio Carlos Jobim, empregando os procedimentos:

Na área dos taludes (bermas), os sulcos e voçorocas foram protegidos com a construção de paliçadas de bambu e sacos de

terra, dispostas no interior dos mesmos. Isto permitirá a redução da velocidade do escoamento superficial e do fluxo de sedimentos, culminando com o aterro progressivo dos sulcos e voçorocas e possibilitando maior eficiência das práticas vegetativas (ANDRADE *et al.*, 2005).

No que concernem as obras de drenagem na reabilitação de áreas degradadas com técnicas de bioengenharia de solos, Pereira (2001) analisando as formas de controle e recuperação de processos erosivos afirmou que:

A drenagem tem por objetivo captar e conduzir as águas pluviais até as redes coletoras. As contribuições de água externas ao talude não poderão ser conduzidas por ele sem que haja proteção. Não se tomando estes cuidados, existe a possibilidade de ocorrência do fenômeno de (piping), o comprometeria os serviços com o passar do tempo. Então, construiu-se canaletas de crista contornando todo o perímetro a montante do talude, recolhendo as contribuições provenientes de áreas próximas. Devido a alta declividade do local, viu-se a necessidade de construção de dissipadores de energia, protegendo a área a jusante. Portanto, as águas coletadas pelas canaletas foram conduzidas até as escadas em degrau e posteriormente até a caixa de dissipação (PEREIRA, 2001).

Após essa etapa, foram aplicados os insumos, como o adubo de palmeira e sementes do capim braquiária. O adubo de palmeira é oriundo da decomposição do tronco de diversos tipos de palmáceas, depois ensacados e comercializados. A recuperação de 2000 m<sup>2</sup> foram necessários 400 sacos desse adubo. O capim braquiária (*Brachiaria brizantha*) apresenta uma boa proteção ao solo e um sistema radicular com tamanho variado, atingindo até 1 metro de profundidade.

Couto *et al.* (2010) estudando as principais técnicas de bioengenharia para revegetação de taludes no Brasil, consideraram que:

O princípio básico que norteia a bioengenharia de solos compreende a utilização de elementos inertes como concreto, madeira, aço e fibras sintéticas em sinergismo com elementos biológicos, como a vegetação, no controle da erosão. As espécies vegetais contribuem com o sistema radicular e o caule, sendo utilizadas em diferentes arranjos geométricos como elementos estruturais e mecânicos para contenção e proteção do solo, melhorando as condições de drenagem e retenção das movimentações de terra (COUTO *et al.*, 2010).

Os geotêxteis foram aplicados após essa fase (Figura 107) com auxílio de grampos de madeira com 20 cm de comprimento. Para facilitar o trabalho, os geotêxteis de buriti foram unidos em grupos de 4 e 8 para cobrir uma área maior e diminuir o uso das estacas. Essas telas ancoram os sedimentos (Figura 108), adubo de palmeira e sementes (servindo para sua germinação), diminuem a velocidade do escoamento superficial, retêm a umidade, diminuem a insolação direta na superfície, fornecem matéria orgânica ao solo, conforme resultados obtidos por Bezerra (2006). Os biotêxteis oferecem proteção ao solo até a encosta ficar estabilizada com a cobertura vegetal. Os índices pluviométricos durante o período de execução das atividades corretivas foram mínimos.

Em relação à importância da cobertura vegetal Fernandes (2004) avaliando as mantas comerciais na vegetação de talude em corte de estrada constatou que:

Os resultados obtidos na pesquisa evidenciaram a importância da revegetação de taludes de cortes de estrada, quer seja em relação à significativa quantidade de sedimentos que são carreados, como também em relação às quantidades de nutrientes contidos nos sedimentos. Portanto os resultados apontam para a importância de políticas efetivas que viabilizem a revegetação de extensas áreas de taludes de cortes de estradas que podem ser encontradas por este País e configuram-se como passivos ambientais (FERNANDES, 2004).

A manutenção das obras de intervenção constitui uma importante etapa nos projetos de reabilitação das áreas degradadas, uma vez que determinadas características (como elevado índice pluviométrico e solos com alta suscetibilidade à erosão, como no caso do Sacavém) podem comprometer todo o trabalho. A manutenção foi realizada com a construção de mais pontos de drenagens (Figura 109) e com registros fotográficos do desenvolvimento da cobertura vegetal.



Figura 106 – Área com aplicação da técnica.

Autoria: Bezerra, 2008.



Figura 107 – Aplicação dos geotêxteis e insumos.

Autoria: Bezerra, 2008.



Figura 108 – Contenção dos sedimentos pelos geotêxteis na voçoroca do Sacavém.

Foto: Bezerra, 2008.



Figura 109 - Área com aplicação da técnica após um mês. Foto: Bezerra, 2008.

## 8. CONCLUSÕES

Os procedimentos metodológicos utilizados nessa tese foram considerados satisfatórios para atingir os objetivos propostos. O mapeamento geomorfológico possibilitou a análise dos diferentes compartimentos do relevo, abrangendo as morfoestruturas, morfoesculturas, formas tabulares, subtabulares, colinas dissecadas, planícies fluviais e fluviomarinha.

A determinação das classes de fragilidade ambiental foi necessária para o mapeamento daquelas áreas mais propícias aos impactos ambientais negativos causados pela interferência antrópica da paisagem, como os voçorocamentos. O processo de urbanização na área de estudo ocasionou uma série de problemas ambientais, como a impermeabilização do solo que está diretamente relacionada à formação do escoamento superficial e subsuperficial.

A morfologia predominante com baixa declividade domina grande parte da paisagem, não oferecendo limitações para a ocupação plena, que vem se processando de modo acelerado e especulativo. Através do desmatamento, a litologia predominantemente sedimentar vem sendo exposta aos agentes morfogenéticos, implicando no aparecimento de processos erosivos de diferentes estágios como ravinas e voçorocas.

As categorias de uso da terra identificadas resultaram da tentativa do homem em organizar o espaço, com o intuito de diminuir os efeitos da suas ações no processo de degradação ambiental na paisagem. Na prática, prevalecem os interesses econômicos para a definição do uso e ocupação do solo. Dessa forma, verificou-se nas áreas de ocorrência dos processos erosivos uma intensa

interferência do homem, através do uso inadequado do solo, da retirada da cobertura vegetal, ocupações irregulares e exploração mineral.

Embora haja uma legislação que regulamenta a ocupação e uso do solo em São Luís, os órgãos responsáveis pelo seu cumprimento, em que pese a boa vontade e o idealismo do trabalho, não estão conseguindo se contrapor aos problemas apresentados, devido à falta de infra-estrutura e de condições gerais de trabalho, à burocracia, às reformas administrativas por que passa o setor público, o que vem acarretando no sucateamento do órgão.

Dessa forma, entende-se que o estudo dos processos erosivos torna-se cada vez mais importante, na medida em que busca a elaboração de projetos de controle e reabilitação, a partir da identificação dos seus mecanismos determinantes, assim como, de que maneira a ação antrópica pode interferir nesses processos, seja de forma positiva ou negativa, pois suas conseqüências, no caso dos impactos negativos envolvem não apenas perdas materiais, mas também humanas.

Devido ao alto estágio erosivo que se encontram as voçorocas estudadas, a utilização de geotêxteis biodegradáveis pode ser a melhor solução, de acordo com os resultados alcançados e bibliografia levantada. Visto que a utilização da engenharia tradicional que se utilizam materiais pesados como concreto, ferro e máquinas de grande porte, além de causar maior impacto aos aspectos naturais e estéticos do ambiente, requerem um elevado investimento de capital, bem como não dá margem à participação da comunidade no processo.

Em relação à estação experimental com técnicas de bioengenharia de solos, o estudo do índice de cobertura vegetal permitiu acompanhar o desenvolvimento da cobertura vegetal, bem como visualizar o “recobrimento” do solo exposto e da geotêxteis biodegradáveis no ponto amostral. Os pinos de erosão demonstraram

diferenças significativas de perda de solo nas duas parcelas com solo exposto, indicando a necessidade aplicação de técnica de conservação solo em superfície sem cobertura vegetal. A parcela com solo exposto apresentou alguns processos que ocorrem em uma superfície sem proteção, como encrostamento do topo dos solos e elevada taxa de transporte de sedimentos. Essas informações confirmaram a importância da vegetação para o solo, ou a utilização de outras formas de conservação que visem a sua proteção.

O potencial matricial, nas diferentes profundidades, demonstrou uma relação direta entre a distribuição da poro-pressão no solo com a geração do escoamento superficial. A parcela com solo exposto apresentou valores próximos à saturação, onde se registrou maior escoamento superficial, e conseqüentemente, perda de sedimentos em relação ao sistema com geotêxteis e gramíneas. Os geotêxteis garantiram uma proteção inicial, formando uma barreira contra o efeito *splash*, escoamento superficial e a remoção de partículas. Os geotêxteis também impediram a remoção das sementes das braquiárias da parcela, servindo como suporte para o seu desenvolvimento.

No tocante às dificuldades encontradas ao longo da tese, que impossibilitaram a análise aprofundada dos dados, citam-se: o monitoramento de dois períodos chuvosos da estação experimental, sendo um entrave para uma análise mais detalhada; o levantamento das propriedades físicas do solo, como densidades real e aparente, matéria orgânica, e taxas de infiltração; monitoramento das cabeceiras das voçorocas identificadas na área da bacia do rio Bacanga. Mesmo assim, este estudo constitui uma importante contribuição para o conhecimento geomorfológico, estudos dos processos erosivos e reabilitação de áreas degradadas com técnicas de bioengenharia de solo no município de São Luís.

## REFERÊNCIAS

- AHN, T.B.; CHO, S.D.; & YANG, S.C. Stabilization of soil slope using geosynthetic mulching mat. In: *Geotextiles and Geomembranes*, 20, p. 135-146, 2002.
- ALMEIDA, F. G. de & GUERRA, A. J. T. Erosão dos solos e impactos ambientais na cidade de Sorriso (Mato Grosso). In: *Impactos Ambientais Urbanos no Brasil*. Guerra, A. J. T. e Cunha, S. B. da. (Orgs). Rio de Janeiro; Bertrand Brasil, p. 21-46, 2001.
- ALVES, R. R., ALVES, R. R., & RODRIGUES, S. C. Impactos ambientais de processos erosivos em microbacia hidrográfica no município de Uberlândia. In: *Anais do IV Simpósio Nacional de Geomorfologia - Geomorfologia: interfaces, aplicações e perspectivas, São Luís*. UFMA. v.1, 2002.
- ANDRADE, A. C. de, LEAL. L. R., GUIMARÃES, R. F. & CARVALHO JUNIOR, O. A. de. Análise dos fatores antrópicos nos processos erosivos na bacia do rio Fêmeas (Barreiras-BA). In: *Anais do IV Simpósio Nacional de Geomorfologia - Geomorfologia: interfaces, aplicações e perspectivas, São Luís*. UFMA, v.1, 2002.
- ANDRADE, A. G.; PORTOCARRERO, H.; & CAPECHE, C. L. Práticas mecânicas e vegetativas para controle de voçorocas. *Comunicado técnico 33*. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Rio de Janeiro, 2005.
- ARAÚJO, H. de S, ALMEIDA, J. R. de & GUERRA, A. J. T. *Gestão ambiental de áreas degradadas*. Ed. Bertrand Brasil, Rio de Janeiro, 2005.
- ARAÚJO, M. M. de; SANTOS, R. V. dos; VITAL, A. de F. M.; ARAÚJO, J. L.; & FARIAS JR., J. A. de. Uso do fósforo em gramíneas e leguminosas cultivadas em Neossolo do semi-árido. In: *Agropecuária Científica no Semi-Árido*, 06, p. 40–46, 2010.

- ARAÚJO, R. R.; SANT'ANNA NETO, J. L.; & MAFRA, R. L. P. Aspectos climáticos do município de São Luís-Maranhão no período de 1961 a 1998. In: *V Simpósio Brasileiro de Climatologia Geográfica*, Curitiba. Contribuições científico-técnicas - V SBCG. Curitiba: Mídia Curitibana, p. 529-539, 2002.
- ARGENTO, M. S. F. Mapeamento Geomorfológico. In: *GUERRA, A. J. T.; & CUNHA, S. B. da* (orgs). *Geomorfologia: uma atualização de bases e conceitos*. 4. ed Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 472p, 2001.
- AZEVEDO, J. A. de & SILVA, E. M. da. Tensiômetro: dispositivo prático para controle da irrigação. Embrapa Cerrados. In: *Circular Técnica*, 001. Planaltina, 33p, 1999.
- AZEVEDO, M. M.; LEITE, L. L.; & BAPTISTA, G. M. de M. The use of digital photographs to quantify vegetation ground cover in degraded areas. In: *Sociedade & Natureza*. Uberlândia, 2005.
- BACELLAR, L. de A. P.; & DRUMOND, F. N. Caracterização hidrossedimentológica e dos processos evolutivos de voçoroca em área de rochas gnáissicas do Alto Rio das Velhas (MG). In: *Revista Brasileira de Geomorfologia*, nº 2, 2006.
- BAGARELLO, V.; DI STEFANO, C.; FERRO, V.; KINNELL, P.I.A.; PAMPALONE, V.; & PORTO, P. Predicting soil loss on moderate slopes using an empirical model for sediment Concentration. In: *Journal of Hydrology*. Accepted Manuscript. 2011.
- BARRETO, V. C. de M.; SILVA, M. L. N.; CURI, N.; OLIVEIRA, F. P. de; REZENDE, P. M. de; & FURTADO, D. F. Índice de cobertura vegetal e sua modelagem para cultivares de soja no Sul de Minas Gerais. In: *Ciênc. agrotec.*, Lavras, v. 34, n. 5, p. 1168-1175, 2010.
- BELLINAZZI, R.; BERTOLINI, D.; ESPINDOLA, C. R.; & LEPSCH, I. F. *Manual Para Levantamento Utilitário do Meio Físico e Classificação de Terras no Sistema de Capacidade de Uso*. Campinas, 173p, 1991.

BELOTTI, F. M. *Perda de solo por erosão na agricultura: a importância das técnicas de manejo e conservação dos solos*. Dissertação (Mestrado). Instituto de Geociências. Universidade Federal de Minas Gerais, 114 p, 2005.

BEZERRA, J. F. R.; GUERRA, A. J. T., & RODRIGUES, S. C. Monitoramento e avaliação de geotêxteis na recuperação de um solo degradado por erosão, Fazenda Experimental do Glória, Uberlândia – MG. In: *XI Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada*. São Paulo. 2005.

BEZERRA, J. F. R.; GUERRA, A. J. T. E.; LIMA, L. D. M.; & MENDONÇA, J. K. S. Geomorfologia aplicada à reabilitação de áreas degradadas por voçorocamento utilizando geotêxteis produzidos com fibra do buriti na área urbana de São Luís - MA. In: *8 Simpósio Nacional de Controle de Erosão dos Solos*. São Paulo. 2009.

BEZERRA, J. F. R. *Avaliação de geotêxteis no controle da erosão superficial a partir de uma estação experimental, Fazenda do Glória – MG*. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Uberlândia. Instituto de Geociências. Programa em Pós-Graduação em Geografia. 104 p, 2006.

BEZERRA, J. F. R. & GUERRA, A. J. T. Geomorfologia e reabilitação de áreas degradadas por erosão com técnicas de bioengenharia. In: *XII Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada*. Natal, 2007.

BEZERRA, J. F. R.; MENDONÇA, J. K. S.; GUERRA, A. J. T.; & FEITOSA, A. C. Proposta de recuperação em áreas degradadas por voçorocas na zona urbana do município de São Luís - MA. In: *Geo UERJ*, v. 1, p. 1-5, 2005.

BHATTACHARYYA, R. *Utilization of palm-mat geotextiles for soil conservation on arable loamy sands in the United Kingdom*. Thesis. University of Wolverhampton. 352p, 2010.

BHATTACHARYYA, R.; FULLEN, M.A.; DAVIES, K. & BOOTH, C.A. Utilizing palm-leaf geotextile mats to conserve loamy sand soil in the United Kingdom. In: *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 130, p 50-58, 2009.

BHATTACHARYYA, R.; SMETS, T.; FULLEN, M.A.; POESEN, J. & BOOTH, C.A. Effectiveness of geotextiles in reducing runoff and soil loss: A synthesis. In: *Catena* 81, p. 184-195, 2010.

BLOOM, A. L. *Geomorphology: a systematic analysis of late Cenozoic landforms*. New Jersey. Prentice Hall, 482 p., 1998.

BOND, L. F. M. *Aplicação de resíduo da produção de enzimas em pastagem estival: seus efeitos no solo e planta*. Dissertação (Mestrado). Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná. 72p, 2009.

BORGES, P. *A evolução dos processos erosivos na bacia do ribeirão. Alam Grei – SP: uma contribuição ao planejamento ambiental*. Dissertação (Mestrado). Instituto de Geociências e Ciências Exatas. Universidade Estadual Paulista. Campus de Rio Claro. 121p, 2009.

BORMANN, H. Towards a hydrologically motivated soil texture classification. In: *Geoderma*, 157, p. 142-153, 2010.

BRASIL. *Código Florestal - Lei no 4.771, de 15 de setembro de 1965 e Lei nº 7.803 de 18 de julho de 1989*. Em: < <https://www.planalto.gov.br/>>. Acesso em 27 de fevereiro de 2004.

BUCKMAN, H; & BRADY, N. *Natureza e propriedades dos solos: compêndio universitário sobre edafologia*. Trad. de Antônio B. Neiva Figueiredo Filho, 4 ed, Rio de Janeiro: Freitas Bastos. Rio de Janeiro: Freitas Bastos. 594 p, 1976.

- CÂNDICE, L. MENDONÇA, J. K. S., CARVALHO, J. R., & GUERRA, A. J. T. Educação Ambiental na comunidade do Sacavém. In: *VII Simpósio Nacional de Geomorfologia*. UFSM. Santa Maria, 2004.
- CARVALHO, A. de P.; MORAES NETO, J. M. de; LIMA, V. L. A. de; & SILVA, D. G. K. C. Estudo da degradação ambiental do açude Bodocongó. In: *Engenharia Ambiental - Espírito Santo do Pinhal*, 6, p. 293-305, 2009.
- CARVALHO, I. S. A Bacia de São Luís. In: *Geologia Histórica*. BRITO, I.M. (ed.). Editora da Universidade Federal de Uberlândia. p. 141-150, 2000.
- CARVALHO, I. S.; VILAS BÔAS, I.; & BERGVIST, L. Plesiossauros da região equatorial brasileira - Bacia de São Luís (Cretáceo Superior), Brasil. In: *Acta Geológica Leopoldensia*, 23, p. 33-41, 2000.
- CARVALHO, L. C. T. *Análise comparativa entre diferentes metodologias utilizadas para recomendação de gesso agrícola em solos cultivados com lavoura de café na Região Sul de Minas Gerais*. Trabalho de Conclusão de Graduação em Cafeicultura, da Escola Agrotécnica Federal de Muzambinho, 2008.
- CASSETI, V. *Geomorfologia*. In: <http://www.funape.org.br/geomorfologia/index.php.2005>.
- CASTILHO, C. P. G.; & FILHO, J. T. A importância da cobertura vegetal na atenuação da precipitação que atinge o solo – estudo de caso: cultura de cana-de-açúcar. In: *VII Simpósio Nacional de Controle de Erosão Goiânia (GO)*, 2001.
- CASTRO, L. A. R. de; ANDREOLI, C. V.; PEGORINI, E. S.; TAMANINI, C. R. FERREIRA, A. C. Efeitos do lodo de esgoto como recuperados de áreas degradadas com finalidade agrícola. In: *V Simpósio Nacional Sobre Recuperação de Áreas Degradadas*. 2002.

CATTAN, P.; RUY, S.M.; CABIDOCHÉ, Y.M.; FINDELING, A.; DESBOIS, P.; & CHARLIER, J. B. Effect on runoff of rainfall redistribution by the impluvium-shaped canopy of banana cultivated on an Andosol with a high infiltration rate. In: *Journal of Hydrology*, 368, p. 251-261, 2009.

CHRISTOFOLETTI, A. Aplicabilidade do conhecimento geomorfológico nos projetos de planejamento. In: GUERRA, Antônio José Teixeira, CUNHA, Sandra B. da (orgs.). Geomorfologia: uma atualização de bases e conceitos. 4 ed. Rio de Janeiro, Bertrand Brasil, 2001.

CHRISTOFOLETTI, A. *Geomorfologia*. São Paulo: Edgard Blücher. 1980.

COELHO NETTO, A. L. Hidrologia e sua interface com a Geomorfologia. In: GUERRA, Antônio José Teixeira, CUNHA, Sandra B. da (orgs.). Geomorfologia: uma atualização de bases e conceitos. 4 ed. Rio de Janeiro, Bertrand Brasil, 2001.

COOKE, R.V. & DOORNKAMP, J.C. *Geomorphology in environmental management: a new introduction*. Oxford Clarendon Press: Oxford. 410p, 1991.

COSTA, P.da; COSTA, M.C.G.; ZILLI J.E.; & TONINI, H. *Recuperação de Áreas Degradadas e Restauração Ecológica de Ecossistemas: Definições e Conceitos*. Boa Vista: Embrapa Roraima, 2005. (Embrapa Roraima. Documentos, 7).

COUTO, L.; GONÇALVES, W.; COELHO, A. T.; PAULA, C. C. de; GARCIA, R.; AZEVEDO, R. F.; LOCATELLI, M. V.; ADVÍNCULA, T. G. de L.; BRUNETTA, J. M. F. C.; COSTA, C. A. B.; GOMIDE, L. C.; & MOTTA, P. H. Técnicas de bioengenharia para revegetação de taludes no Brasil. In: *Boletim Técnico CBCN*, N° 001, Viçosa, 2010.

CREMER, M. J. Projeto canal do linguado estudos da biota marinha e química ambiental da baía da Babitonga. Universidade da Região de Joinville. *Relatório Final*. Março, 2004.

CRISPIM, S. M. A & BRANCO, O. D. Aspectos gerais das Braquiárias e suas Características na Sub-Região da Nhecolândia, Pantanal. In: *Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento – EMBRAPA*. Corumbá, 2002.

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

DALVAN, J. R.; & REICHERT, J. M. *Propriedades físicas do solo*. Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Ciências Rurais. Santa Maria, 2006.

DE BAETS, S.; POESEN, J.; GYSSELS, G.; & KNAPEN, A. Effects of grass roots on the erodibility of topsoils during concentrated flow. *Geomorphology*, 76, p. 54-67, 2006.

DEFLOR. *Principais vantagens dos Geotêxteis Antierosivos*. <http://www.deflor.com.br/portugues/produtos.html#>. Acessado em 19 de agosto de 2005.

DERBYSHIRE, E; GREGORY, K. J; & HAILS, J. R. *Geomorphology process*. Ed. Dowson & Son, England. 1979.

DESCHEEMAER, K., NYSSSEN, J., POESEN, J., RAES, D., HAILE, M., MUYS, B. & DECKERS, S. Runoff on slopes with restoring vegetation: A case study from the Tigray Highlands, Ethiopia. In: *Journal of Hydrology*, 331, p. 219-241, 2006.

DIAS, G. F. *Educação e gestão ambiental*. São Paulo: Gaia, 2006.

DINIZ, J. S. *Expansão e organização do espaço urbano em São Luís (1980/90): uma abordagem sistêmica*. Monografia de Especialização/UFMA. São Luís, 1993. 63 p.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. *Sistema brasileiro de classificação de solos*. Rio de Janeiro, 412 p., 1999.

EMBRAPA. *Manual de Métodos e Análises Solo*. Rio de Janeiro, EMBRAPA/SNLCS. 212 p., 1997.

ENZWEILER, Jacinta. *Espectrometria de Fluorescência de Raios X*. <http://www.ige.unicamp.br/site/aulas/9/FRX-texto.pdf>. Capturado em novembro de 2010.

FARIA, P. H. de S.; & SANTOS, H. I. dos. *Uso do lodo primário de esgoto urbano de ETE's na recuperação de áreas degradadas*. Artigo (Engenharia Ambiental). Universidade Católica de Goiás. Goiânia, 2007.

FATAHIA, B.; KHABBAZA, H.; & INDRARATNA, B. Bioengineering ground improvement considering root water uptake model. In: *Ecological Engineering*, 36, p. 222-229, 2010.

FEITOSA, A. C. Relevo do Estado do Maranhão: uma nova proposta de classificação topomorfológica. In: *VI Simpósio Nacional de Geomorfologia/Regional Conference on Geomorphology*. Goiânia, 2006.

FEITOSA, A. C. *Dinâmica dos Processos geomorfológicos da área costeira a nordeste da ilha do Maranhão*. Tese de Doutorado. Rio Claro: IGCE - Cp – UNESP. 249p,1996.

FEITOSA, A. C. *Evolução geomorfológica do litoral norte da Ilha do Maranhão*. Dissertação de Mestrado. Rio claro: IGCE – UNESP, 210p, 1989.

FERNANDES, L. S. *Avaliação de mantas comerciais na vegetação de talude em corte de estrada*. Tese (Doutorado). Universidade Federal de Viçosa, Programa de Pós-graduação em Ciência Florestal. 81p, 2004.

FERREIRA, A. J. de A. *A estrutura espacial urbana maranhense*. Monografia de graduação. São Luís. 68 p., 1989.

FERREIRA, V. M. *Voçorocas no município de Nazareno - MG: origem, uso da terra e atributos do solo*. Dissertação (Mestrado) - UFLA. Universidade Federal de Lavras, Programa de Pós-Graduação em Agronomia. 84 p., 2005.

FONSECA, M. de J. B. *Evolução do uso da terra e problemas ambientais na área da bacia do rio Paciência: 1976 a 1995*. Monografia de Especialização. São Luís, 2001.

FRANCISCO, A. B.; & NUNES, J. O. R. Aplicação de metodologia de estaqueamento para estudo do processo de voçorocamento no município de Rancharia-SP. In: *Caderno Prudentino de Geografia*, 1, 2009.

FULLEN, M. A. & GUERRA, A. J. T. The potencial of palm (*Borassus*) mat geotextiles as a soil conservation technique. In: *IV Simpósio Nacional de Geomorfologia*. São Luís, 2002.

FULLEN, M.A. & CATT, J.A. *Soil Management: Problems and Solutions*. Arnold Publishers. London, 269p, 2004.

FURTADO, M. S.; MENDONÇA, J. K. S.; FEITOSA, A. C.; & GUERRA, A. J. T.,. Processo de recuperação da voçoroca do Sacavém, São Luís-MA. In: *VI Simpósio Nacional de Geomorfologia/Conferência Regional de Geomorfologia*. Goiânia, 2006.

GANGOLELLS, M.; CASALS, M.; GASSÓ, S., FORCADA, N.; ROCA, X.; & FUERTES, A. A methodology for predicting the severity of environmental impacts related to the construction process of residential buildings. In: *Building and Environment*, Volume 44, Issue 3, p. 558-571, 2009.

GARDINER, V. International collaborators, geomorphology and environmental management. In: *International Geomorphology*. John Wiley & Sons. University of Manchester, 1986.

GODOI, E. L. de; BORGES, J. D.; & LEANDRO, W. M. Índices de cobertura vegetal e fitomassa de *Stylosanthes guianensis* cv. Mineirão em área degradada, fertilizada

com adubo mineral e biossólido. In: *Pesquisa Agropecuária Tropical*, 38, p. 21-26, 2008.

GOETHALS, M.M.; NIEDERMANN, S.; HETZEL, R.; & FENTON, C.R. Determining the impact of faulting on the rate of erosion in a low-relief landscape: A case study using in situ produced  $^{21}\text{Ne}$  on active normal faults in the Bishop Tuff, California. In: *Geomorphology*, 103, p. 401-413, 2009.

GONÇALVES, D. F.; ROSSETTI, D. de F.; TRUCKENBRODT, W.; & MENDES, Anderson Conceição. Argilominerais da Formação Codó (Aptiano Superior), Bacia de Grajaú, Nordeste do Brasil. In: *Latin American Journal of Sedimentology and Basin Analysis*. 13, p. 59-75, 2006.

GONÇALVES, L. F. H. & GUERRA, A. J. T. Movimento de massa na cidade de Petrópolis (Rio de Janeiro). In: *GUERRA, A. J. T. & CUNHA, S. B. da. (Orgs). Impactos Ambientais Urbanos no Brasil*. Rio de Janeiro; Bertrand Brasil, 2001, p.189-252.

GORAYEB, P. S. de S.; GAUDETTE, H.; MOURA, C. A. V. & ABREU, F. de A. M. de. Geologia e geocronologia da Suíte Rosário, Nordeste do Brasil, e sua contextualização geotectônica. In: *Revista Brasileira de Geociências*, 29, p. 571-578, dezembro de 1999.

GREGORY, K. J., BENITO, G., & DOWNS, P. W. Applying fluvial geomorphology to river channel management: Background for progress towards a palaeohydrology protocol. In: *Geomorphology*, 98, p. 153-172, 2008.

GUAPYASSSÚ, M. dos S.; & HARDT, L. P. A. Avaliação de fragilidade ambiental: uma nova abordagem metodológica para unidades de conservação de uso indireto em áreas urbanas. In: *Floresta e Ambiente*, 5, p. 55-67, 1998.

GUERRA, A. J. T & MARÇAL, M. dos S. *Geomorfologia Ambiental*. Rio de Janeiro, Bertrand Brasil, 2006.

GUERRA, A. J. T. Encostas e a questão ambiental. In: *CUNHA, S. B. & GUERRA, A. J. T. (Orgs). A questão ambiental: diferentes abordagens*. Rio de Janeiro, Bertrand Brasil, 2003.

GUERRA, A. J. T. O Início do Processo Erosivo. In: *GUERRA, A. J. T.; SILVA A. S.; & BOTELHO, R. G. M. (Orgs). Erosão e Conservação dos Solos - Conceitos, Temas e Aplicações..* Editora Bertrand Brasil, Rio de Janeiro, 1999.

GUERRA, A. J. T. O papel da matéria orgânica e dos agregados na erodibilidade dos solos. In: *Anuário do instituto de geociências*, 13, p. 43-52, 1990.

GUERRA, A. J. T. Processos Erosivos nas Encostas. In: *CUNHA, S. B. & GUERRA, A. J. T. (Orgs). Geomorfologia: exercícios, técnicas e aplicações*. Rio de Janeiro, Bertrand Brasil, 1996.

GUERRA, A. J. T. Experimentos e monitoramentos em erosão dos solos. In: *Revista do Departamento de Geografia*, 16, p. 32-37, 2005.

GUERRA, A. J. T.; SATHLER, R.; MENDES, S. P.; SILVA, S. L. S.; GUERRA, T. T.; ARAÚJO, I. H. M.; LIMA, F. S.; FULLEN, M. A.; BOOTH, C. A.; MENDONÇA, J. K. S.; FURTADO, M. S.; SOUZA, U. D. V.; & RIBEIRO, F. V. Urban gully assessment in São Luis city (Maranhão State), Brazil, using penetrometer data and soil properties. In: *VI Regional Conference on Geomorphology*. Goiania, 2006.

GUERRA, A. T. & GUERRA, A. J. T. *Novo Dicionário Geológico-Geomorfológico*. Bertrand Brasil, Rio de Janeiro, 648p, 1997.

GUERRA, A. J. T.; & CUNHA, S. B. (ORGS.). *Geomorfologia e meio ambiente*. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1996.

GUERRA, A. J. T.; MENDES, S. P.; LIMA, F. S.; SATHLER, R.; GUERRA T. T.; MENDONÇA, J. K. S. & BEZERRA, J. F. R. Erosão urbana e recuperação de áreas degradadas no Município de São Luís - Maranhão. In: *Revista de Geografia*, 26, p. 85-135, 2009.

GUTIÉRREZ-JURADO, H. A.; VIVONI, E. R.; HARRISON, J. B. J.; & GUAN, H. Ecohydrology of root zone water fluxes and soil development in complex semiarid rangelands. In: *Hydrological Processes*, 20, p. 3289-3316, 2006.

HJORTA, J. & MARMIONB, M. Effects of sample size on the accuracy of geomorphological models. In: *Geomorphology*, 102, p. 341–350, 2008.

HU ZHEN-QI; HE FEN-QIN; YIN JIAN-ZHONG; LU XIA; TANG SHI-LU; WANG LIN-LIN & LI XIAO-JING. Estimation of Fractional Vegetation Cover Based on Digital Camera Survey Data and a Remote Sensing Model. *J China Univ Mining & Technol*, 17, p. 0116–0120, 2007.

IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística). *Censo Demográfico - Brasil - 2010*. Rio de Janeiro: IBGE, 2010.

IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística). *Zoneamento geoambiental do Estado do Maranhão: diretrizes gerais para a ordenação territorial*. Salvador, 1997.

IKEMATSU, P.; SILVA, A. M. da; PAULA, F. P. de; NOGUEIRA, D. P.; SILVEIRA, F. M.; ALVES, S. H. & BOMBACK, M. Dimensionamento e estudo dos fatores condicionantes de duas voçorocas localizadas no município de Sorocaba (SP). In: *Caminhos de Geografia*, 8, p. 76 – 85, 2007.

INSTITUTO AGRONÔMICO DE CAMPINAS. Informação sobre interpretação e análise de solo, Centro de Pesquisa e Desenvolvimento de Solos e Recursos Ambientais, IAC, Campinas-SP, Disponível em:

<http://www,iac,sp,gov,br/UniPesquisa/Solo/Serviço/Interpretação,asp> , acessado em 11/09/2009,

KAWAKUBO, F. S.; MORATO, R. G.; CAMPOS, K. C.; LUCHIARI, A.; & ROSS, J. L. S. Caracterização empírica da fragilidade ambiental utilizando geoprocessamento. In: *Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (SBSR)*, Goiânia, 2005, p. 2203-2210.

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

KIRKBY, M.J.; BULL, L.J.; POESEN, J.; NACHTERGAELE, J. & VANDEKERCKHOVE, L. Observed and modelled distributions of channel and gully heads—with examples from SE Spain and Belgium. In: *Catena*, 50, p. 415– 434. 2003.

KOFFLER, Natalino Felipe. Uso das terras da bacia do rio Corumbataí em 1990. In: *Geografia*, Rio Claro, 18: p. 135-150, abril 1993.

LEKHA, K. R. Field instrumentation and monitoring of soil erosion in coir geotextile stabilised slopes – a case study. In: *Geotextiles and geomembranes*, 22, p. 399-413. 2004.

LEPSCH, I. F. *Formação e Conservação dos Solos*. Ed. Oficina de textos, São Paulo, 1993.

LI, M., EDDLEMAN, K. E. Biotechnical engineering as an alternative to traditional engineering methods: A biotechnical streambank stabilization design approach. *Landscape and Urban Planning*, 60, p. 225-242, 2002.

LIMA, L. D. M.; SILVEIRA, P. G.; SILVA, F. F.; & LOUREIRO, H. A. S. Estudo dos Processos Erosivos no Médio e Alto Cursos da Bacia Hidrográfica do Rio Macaé, Macaé/RJ. *Geografia*. In: *Ensino & Pesquisa*, v. 12, p. 000-000, 2008.

LORENZI, H.; SOUZA, H. M. de; COSTA, J. T. de M.; CERQUEIRA, L. S. C. de; & BEHR, N. *Palmeiras no Brasil: exóticas e nativas*. Nova Odessa, São Paulo: Editora Plantarum, 1996.

LOSHITERU, K. D. *A importância estratégica do potássio para o Brasil*. Embrapa Cerrados, 2003. Planaltina, DF, 27 p, 2003.

LOUREIRO, C. F. B. Educação Ambiental e movimentos sociais na construção da cidadania ecológica e planetária. In: LOUREIRO, C. F. B.; LAYRARGUES, P. P.; & CASTRO, R. S.(orgs.). *Educação Ambiental: repensando o espaço da cidadania*. 3. ed. São Paulo: Cortez, 2005.

LOUREIRO, H. A. S.; SILVA, F.F.; SILVEIRA, P.G.; GUERRA. A. J. T.; & LIMA, L. D. M. Feições Erosivas e Uso da Terra Ao Longo da Linha de Transmissão de Energia em Mato Grosso do Sul. In: *VII Simpósio Nacional de Geomorfologia & II Encontro Latino-Americano de Geomorfologia*, 2008.

MACAMBIRA, T. M.; & CORRÊA, J. A. M. Mineralogia dos pelitos Albianos, porção oeste da Bacia de Barreirinhas, MA. In: *4º PDPETRO*, Campinas, 2007.

MAHMOOD-UL-HASSAN, M. & GREGORY, P.J. Dynamics of water movement on Chalkland. In: *Journal of Hydrology*, 257, p. 27-41, 2002.

MARANHÃO. Secretaria de Estado do Meio Ambiente e Recursos Hídricos. *Diagnóstico ambiental da microrregião da aglomeração urbana de São Luís e dos Municípios de Alcântara, Bacabeira e Rosário*. São Luís, 1998.

MENDES, S. P.; SATHLER, S.; & GUERRA, A. J. T. Dinâmica dos Processos Erosivos numa Voçoroca no Parque Estadual do Bacanga (MA). *Geografia*. In: *Ensino & Pesquisa (UFMS)*, v. 12, p. 1408-1422, 2008.

MENDONÇA, J. K. S; GUERRA, A. J. T; & MENDES, M. R. Diagnóstico da erosão urbana no município de São Luís-MA. *VII Simpósio Nacional de Controle de Erosão*. Goiânia (GO), 2001.

MENDONÇA, J. K. S. *Interferência Antrópica nos Processos Erosivos em Áreas da Bacia do Rio das Bicas, São Luís – MA*. Monografia de Graduação. Universidade Federal do Maranhão. 2003.

MENDONÇA, J. K. S. *Diagnóstico da erosão urbana no município de São Luis - MA*. Relatório CNPq. São Luis, Universidade Federal do Maranhão. 2004.

MENDONÇA, J. K. S. *Uso sustentável de espécies de palmeiras da APA da Baixada Maranhense para controle e recuperação de áreas degradadas por erosão*. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Maranhão. Departamento e Oceanografia e Limnologia. Programa de Pós-Graduação Sustentabilidade de Ecossistemas. 2006.

MORGAN, R.P.C. A simple approach to soil loss prediction: a revised Morgan–Morgan–Finney model. In: *Catena*, 44, p. 305–322. 2001.

MORGAN, R.P.C. *Soil erosion and conservation*. Ed. Longman, England, 1995.

MORGAN, R.P.C.; MCINTYRE, K.; VICKERS, A.W.; QUINTON, J.N.; & RICKSON, R.J. A rainfall simulation study of soil erosion on rangeland in Swaziland. In: *Soil Technology*, 11, p. 291-299. 1997.

MORGAN, R.P.C. *Soil conservation: problems and prospects*. Ed. John Wiley & Son. New York. 1981.

MOTA, S. *Urbanização e meio ambiente*. Rio de Janeiro: ABES, 356 p. 1999.

MURRAY, A. B.; LAZARUS, E.; ASHTON, A.; BAAS, A.; COCO, G.; COULTHARD, TOM; FONSTAD, M.; HAFF., P.; MCNAMARA, D.; PAOLA, C.; PELLETIER, J.; &

REINHARDT, L.; Geomorphology, complexity, and the emerging science of the Earth's surface. In: *Geomorphology*, 103, p. 496–505. 2009.

NASCIMENTO, L. F.; SOUZA, W. L. da S.; FERREIRA, J. T. P.; NUNES, M. F. F. N.; CRUZ, C. M. C. A.; CANTALICE, J. R. B.; & GALINDO, I. C. de L. Teores de macronutrientes no solo sob três sistemas de manejo distintos. In: *Jornada de Ensino, Pesquisa e Extensão – JEPEX 2010 – UFRPE: Recife*, 2010.

NOVAES, R. C.; TAROUCO, J. E. F.; RANGEL, M. E. S.; DIAS, L. J. B. da S. Análise da sensibilidade ambiental da parte ocidental da Ilha do Maranhão. In: *Anais XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*. Florianópolis, INPE, p. 4089-4096. 2007.

OLIVEIRA, M. A. T. *Processos Erosivos e Preservação de Áreas de Risco de Erosão por Voçoroca*. In: GUERRA, A. J. T., SILVA, A. S. & BOTELHO, R. G. M. (Orgs). *Erosão e Conservação dos Solos: conceitos, temas e aplicações*. Rio de Janeiro, Bertrand Brasil, 1999.

OLIVEIRA, N. M. G. A.; CARVALHO, J. A. R.; & SILVA, J. N. Degradação ambiental no bairro dos estados, município de Camaragibe-PE: sistema de voçorocas. In: *Cadernos de Cultura e Ciência*, 2, 2007.

OLIVEIRA, W. S. A. de. *Avaliação dos atributos químicos e físico de um solo submetido a diferentes tipos de uso no Acre*. Dissertação (Mestrado em Agronomia – Produção Vegetal) – Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação, Universidade Federal do Acre, Rio Branco – Acre, 54 p. 2008.

PENTEADO, M. M. *Fundamentos de Geomorfologia*. Rio de Janeiro: IBGE. 1980.

PEREIRA JUNIOR, E. B. *Efeito do pisoteio ovino sobre atributos do solo, em área de coqueiral*. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Campina Grande. Centro de Saúde e Tecnologia Rural. 2006.

PEREIRA, A. R. Controle e recuperação de processos erosivos com técnicas de bioengenharia. In: *VII Simpósio Nacional de Controle de Erosão*, Goiânia (GO), 2001.

PEREIRA, E. D.; GUERRA, A. J. T.; MAFRA, R. L. P.; CIRILLO, W. B.; TABOSA, N. Estudo dos processos erosivos nas áreas urbanas e costeiras da Ilha do Maranhão – MA. In: *VII Simpósio Nacional de Controle de Erosão Goiânia* (GO), 2001.

PEREIRA, E. D. *Avaliação da vulnerabilidade natural à contaminação do Solo e aquífero do reservatório Batatã - São Luís (MA)*. Tese (Doutorado). Universidade Estadual Paulista Instituto de Geociências e Ciências Exatas. Campus de Rio Claro. 2006.

PEREIRA, S. de J.; MUNIZ, G. I. B. de; KAMINSKI, M; KLOCK, U.; NISGOSKI, S.; & FABROWSKI, F. J. Celulose de buriti. In: *Scientia Florestalis*, p. 202-213, 2003.

PESSOA, V. C. de O. & BORGHI, L. Análise faciológica da Formação Itapecuru (Cretáceo, Bacia do Parnaíba) em testemunhos de sondagem. In: *3º Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo e Gás*. Salvador, 2005.

POESEN, J.; DE LUNA, E.; FRANCA, A.; NACHTERGAELE, J. & GOVERS, G. Concentrated flow erosion rates as affected by rock fragment cover and initial soil moisture content. In: *Catena*, 36, p. 315–329. 1999.

RAMALHO, M. F. de J. L. *Evolução dos processos erosivos em solos arenosos entre os municípios de Natal e Parnamirim – RN*. Tese (Doutorado). Rio de Janeiro. UFRJ. 1999.

REICHARDT, K.; & TIMM, L. C. *Solo, Planta e atmosfera: Conceitos, Processos e Aplicações*. Manole, São Paulo, 478 p., 2004.

REICHARDT, Klaus. *Processos de transferência no sistema solo-planta-atmosfera*. Fundação Cargil, São Paulo, 1985.

- REIGOTA, M. *A floresta e a escola: por uma Educação Ambiental pós-moderna*. 2. ed. São Paulo: Cortez, 2002.
- REZENDE, C. I. de O. R. *Influência da aplicação do lodo de esgoto (Biossólido) sobre a concentração e o estoque de nutrientes na biomassa do su-bosque, na serapilheira e no solo de um talhão de E. grandis*. Dissertação (Mestrado). Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Universidade de São Paulo. 2005.
- RITTER, D. F. *Process Geomorphology*. Dubuque: Wm. C. Brown Publishers, 2nd ed., 1986.
- RODRIGUES, S. C. & BRITO, J. L. S. Mapeamento geomorfológico de detalhe - uma proposta de associação entre o mapeamento tradicional e as novas técnicas em geoprocessamento. In: *Caminhos de Geografia*, 1, p.1-6, 2000.
- ROSS, J. L. S. Análise empírica da fragilidade dos ambientes naturais e antropizados. In: *Revista do Departamento de Geografia*, 8, p. 63-74. 1994.
- ROSS, J. L. S. *Geomorfologia Ambiente, Planejamento*. Editora Contexto, São Paulo, 1991.
- ROSS, J. L. S. *Geomorfologia e geografia aplicadas a gestão territorial: teoria e metodologia para o planejamento ambiental*. Tese (Livre Docência) – Departamento de Geografia, Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo. 322 p. 2001.
- ROSS, J. L. S. Registro cartográfico dos fatos geomorfológicos e a questão da taxonomia do relevo. In: *Geografia*. São Paulo, IG-USP, 1992.
- ROSSETTI, D. F. & TRUCKENBRODT, W. Revisão estratigráfica para depósitos do Albiano—Terciário Inferior na Bacia de São Luís, Maranhão. In: *Sér. Ciênc. Terra*, 9, p. 29-41, 1997.

- ROSSETTI, D. de F. Evolução sedimentar miocênica nos estados do Pará e Maranhão. In: *Geol. USP, Sér. cient.* vol.6, n.2, p. 7-18. 2006.
- RUIZ-SINOGA, J. D., MARTÍNEZ-MURILLO J. F. Eco-geomorphological system response variability to the 2004–06 drought along a climatic gradient of the Littoral Betic Range (southern Spain). In: *Geomorphology*, 103, p. 351-362, 2009.
- SALOMÃO, F. X. T. *Controle e preservação dos processos erosivos*. In: GUERRA, A. J. T., SILVA, A. B., BOTELHO, R. C. M (Orgs). *Erosão e conservação dos solos: conceitos, temas e aplicações*. Rio de Janeiro. Bertrand Brasil, 1999.
- SANTOS, M. E. C. M.; & CARVALHO, M. S. S. *Paleontologia das Bacias do Parnaíba, Grajaú e São Luiz: reconstituições paleobiológicas*. CPRM, Rio de Janeiro , 2004.
- SANTOS, R. B. dos. *Metodologias para geração e atualização de mosaicos de fotos aéreas no Projeto ARARA*. Dissertação (Mestrado). USP, 2004.
- SATHLER, R.; POLIVANOV, H.; GUERRA, A. J. T. & BARROSO, E. V. Caracterização de Voçorocas na Ilha do Maranhão. In: *Anuário do Instituto de Geociências – UFRJ*, 32, 2009.
- SATHLER, R. *Evolução de voçorocas na Ilha do Maranhão: Uma abordagem pedogeotécnica para recuperação de áreas degradadas*. Tese (Doutorado). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto de Geociências. 2010.
- SATHLER, R.; GUERRA, A. J. T.; POLIVANOV, H.; & MARÇAL, M. Erosive processes in urban areas on the island of Maranhão – Brazil. In: *Sociedade & Natureza (Special Issue)*, p. 161-173, 2005.
- SATO, M. *Educação Ambiental*. São Carlos: RiMa, 2004.
- SELBY, M. J. *Hillslope Materials and Processes*. Oxford: Oxford University Press, 2 ed., 1993.

- SHOU, K., CHEN, & Y., LIU, H. Hazard analysis of Li-shan landslide in Taiwan. In: *Geomorphology*, 103, p. 143-153, 2009.
- SILVA, A. J. de P. & PASQUALETTO, A. *Análise da Voçoroca na Cabeceira do Córrego Grotá, no Município de Joviânia – GO*. Monografia (Graduação). Pontifícia Universidade Católica de Goiás. Goiânia, 2007.
- SILVA, A. J. P. da; LOPES, R. da C.; VASCONCELOS, A. M. & BAHIA, R. B. C. Bacias sedimentares paleozóicas e meso-cenozóicas interiores. In: *BIZZI, L.A; SCHOBENHAUS, C; VIDOTTI, R.M e GONÇALVES, J.H (eds)*. Geologia, Tectônica e Recursos Minerais do Brasil. Brasília: CPRM, 2003.
- SILVA, C. E. M.; GONÇALVES, J. F. de C.; FELDPACH, T. R.; LUIZÃO, F. J.; MORAIS, R. R.; & RIBEIRO, G. O. Eficiência no uso dos nutrientes por espécies pioneiras crescidas em pastagens degradadas na Amazônia central. In: *Acta Amazonica*, 36, Manaus, p. 503-512, 2006.
- SILVA, J. B.; BACCARO, C. A. D.; CAMPOS, C. A. A.; PEREIRA, K. G. de O. Uso de *Plots* na mensuração da perda de solo por erosão laminar na Micro-bacia do Córrego da Divisa – Irai de Minas – MG. In: *VIII Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada*. Belo Horizonte, 1999.
- SILVA, J. E. B. da & GUERRA, A. J. T. G. Análise das propriedades dos solos das sub-bacias do rio Tindiba e do córrego do Catonho, Rio de Janeiro, com fins à identificação de áreas com predisposição à erosão. In: *VII Simpósio Nacional de Controle de Erosão*. Goiânia (GO), 2001.
- SILVA, O. G. da & GUERRA, A. J. T. *Diagnósticos de feições erosivas em logradouros no bairro de Nova Descoberta – Recife/ Pe*. In: *Anais do IV Simpósio Nacional de Geomorfologia*, 2002.

SILVA, T. I.; & RODRIGUES, S. C. Tutorial de cartografia geomorfológica Arcgis 9.2 e Envi 4.0. Manuais Técnicos. In: *Revista Geografia. Acadêmica*, 3, 2009.

SILVEIRA, L. R. da; MENDONÇA, R. M. G.; & BONATTO, F. Análise e monitoramento da voçoroca Ribeirão da Cachorra em Paraíso do Tocantins. In: *VI Simpósio Nacional de Geomorfologia/Regional Conference on Geomorphology. Goiânia*, 2006.

SMETS, T. & POESEN, J. Impacts of soil tillage on the effectiveness of biological geotextiles in reducing runoff and interrill erosion. In: *Soil & Tillage Research*, 103, p. 356-363. 2009.

SMETS, T.; POESEN, J. & KNAPEN, A. Spatial scale effects on the effectiveness of organic mulches in reducing soil erosion by water. In: *Earth-Science Reviews*, 89, p. 1-12, 2008.

SMETS, T.; POESEN, J.; KNAPEN, A.; LANGHANS, C.; KNAPEN, A. & FULLEN, M. A. Concentrated flow erosion rates reduced through biological geotextiles. In: *Earth Surface Processes and Landforms*, 34, p. 493-502, 2009.

SOARES JUNIOR, A. V.; COSTA, J. B. S.; HASUI, Y. Evolução da margem atlântica equatorial do Brasil: três fases distensivas. In: *Geociências*, 27, p. 427-437, 2008.

SOCOL, O. J.; CARARO, D. C.; SILVA, Ê. F. de F.; & ULLMANN, M. N. Condutância hidráulica e tempo de resposta de tensiômetros utilizados em cultivos fertirrigados. In: *Revista de Ciências Agroveterinárias*, 4, p. 3-10, 2005.

SOUSA, A. T. de. Processo erosivo linear na bacia do córrego Pontinhas em Orizona – GO. In: *Anais do IV Simpósio Nacional de Geomorfologia - Geomorfologia: interfaces, aplicações e perspectivas*, São Luís, UFMA, 2002.

- SOUSA, E. P. de. *Os Dipnoiformes da Formação Alcântara (Albo-Cenomaniano), Ilha do Cajual, Maranhão*. Dissertação (Mestrado). Universidade Estadual Paulista, Instituto de Geociências. Rio Claro, 103 p., 2006.
- SOUZA, H. de. *Teores e concentrações de cálcio e magnésio no cafeeiro recepado em função de doses e fontes de  $P_2O_5$* . Monografia (Graduação). Escola Agrotécnica Federal de Muzambinho, 2008.
- SPÖRL, C; & ROSS, J. L. S.; Análise comparativa da fragilidade ambiental com aplicação de três modelos. In: *GEOUSP - Espaço e Tempo*, 15, p. 39-49, 2004.
- STRAHLER, A. N. & STRAHLER, A. H. - *Geografia Física* (tradução espanhola. 3ª edição), Barcelona, Ediciones Omega, 550 p., 2000.
- SUDO, H. Processos erosivos e variabilidade climática. In: *SANT' ANNA NETO, J. L.; & ZAVATINI, J. A. (Orgs). Variabilidade e mudanças climáticas – implicações ambientais e sócioeconômicas*. Maringá. UEM. 2000.
- SULSOFT. *Guia do ENVI em Português*. <http://www.envi.com.br>. Capturado em 15 de Junho de 2004.
- SUMMERFIELD, M. A. *Global Geomorphology*. New York: Longman Scientific & Technical, 1991.
- SURIANI, M. W.; GIL, I. C.; e MACHADO, R. E. Análise ambiental da microbacia hidrográfica do córrego Taipús, município de Adamantina – SP. In: *ANAP – Brasil, Revista científica*, 2, 2009.
- SUTHERLAND, R. A. Rolled erosion control systems for hillslope surface protection: a critical review, synthesis and analysis of available data. II. the post-1990 period. In: *Land Degradation & Development*, 9, p. 487-511, 1998.

SUTHERLAND, R. A. Rolled erosion control systems for hillslope surface protection: a critical review, synthesis and analysis of available data. I. Background and formative years. *Land Degradation & Development* 9: 465-486. 1998a.

SUTHERLAND, R. A. Rolled erosion control systems for hillslope surface protection: a critical review, synthesis and analysis of available data. II. the post-1990 period. In: *Land Degradation & Development*, 9, p. 487-511, 1998b.

TAUK, S. M. Biodegradação de resíduos orgânicos no solo. In: *Revista Brasileira de Geociência*, 20, p. 299-301, 1990.

THOMAZ, E. L. & ANTONELI, V. Erosão e degradação do solo em área cultivada com erva-mate (*Ilex paraguariensis*), Guarapuava – PR. São Paulo, UNESP. In: *Geociências*, 27, p. 21-30, 2008.

THORNBURY, W. *Principles of Geomorphology*. Wiley, New York, 1954.

TRICART, J. P. Geomorphology for development and development for Geomorphology. In: *International Geomorphology*. John Wiley & Sons. University of Manchester, 1986.

VACCA, A.; LODDO, S.; OLLESCH, G.; PUDDU, R.; SERRA, G.; TOMASI, D. & ARU, A. Measurement of runoff and soil erosion in three areas under different land use in Sardinia - Italy. In: *Catena*, 40, p. 69-92. 2000.

VEIGA JÚNIOR, J. P. *Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil. São Luís NE/SE, Folhas SA.23-X e SA.23-Z. Estados do Maranhão e Piauí. Escala 1:500.000. Brasília: Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais - CPRM, 2000.*

VIEIRA, A. F. G. O cadastramento como forma de identificação, localização e monitoramento de voçorocas. In: *Anais do IV Simpósio Nacional de Geomorfologia - Geomorfologia: interfaces, aplicações e perspectivas*, São Luís, 2002.

B574

Bezerra, José Fernando Rodrigues.

Geomorfologia e reabilitação de áreas degradadas por erosão com técnicas de bioengenharia de solos na bacia do rio Bacanga, São Luís – MA. Rio de Janeiro: UFRJ/PPGG, 2011.

249 f.: il.

Tese (Doutorado em Geografia) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, PPGG/IGEO, 2011.

Orientadores: Antônio José Teixeira Guerra e Michael A. Fullen

1. Geomorfologia 2. Voçorocas 3. Geotêxteis 4. Reabilitação 5. Bioengenharia de solos.

I. Guerra, Antônio José Teixeira. II. Fullen, Michael A. III. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto de Geociências, Programa de Pós-graduação em Geografia. IV. Título.

CDD 551.4