

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS E CIÊNCIAS EXATAS
Campus de Rio Claro**

**AVALIAÇÃO DA VULNERABILIDADE NATURAL À CONTAMINAÇÃO DO
SOLO E AQUÍFERO DO RESERVATÓRIO BATATÃ - SÃO LUÍS (MA)**

Ediléa Dutra Pereira

Orientador: Prof. Dr. José Eduardo Zaine

Tese de Doutorado apresentada junto ao Curso de Pós-graduação em Geociências – Área de concentração em Geociências e Meio Ambiente, para obtenção do Título de Doutor em Geociências.

Rio Claro (SP)
2006

624.151 Pereira, Ediléa Dutra
P436a Avaliação da vulnerabilidade natural à contaminação do
solo e do aquífero do Reservatório Batata – São Luís - MA /
Ediléa Dutra Pereira. – Rio Claro : [s.n.], 2006
133 f. : il., tabs., fots., mapas

Tese (doutorado) – Universidade Estadual Paulista,
Instituto de Geociências e Ciências Exatas
Orientador: José Eduardo Zaine

1. Geologia de engenharia. 2. Mapeamento geológico-
geotécnico. 3. Detalhamento progressivo. 4. Vulnerabilidade
natural. 5. Método GOD. 6. Infiltração. I. Título.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. José Eduardo Zaine (orientador)

Prof. Dr. Antonio Roberto Saad

Prof. Dr. Edson Gomes de Oliveira

Prof. Dr. José Luiz Albuquerque Filho

Prof. Dr. Fábio Augusto Vieira Reis

Rio Claro, 24 de fevereiro de 2006.

*Ao meu companheiro de todas as horas Jorge Luiz;
Meus filhos André Luiz e Daniel;
Meus pais Benedito (in memoriam) e Antonia.*

AGRADECIMENTOS

À Deus, pela vida.

Ao Prof. Dr. José Eduardo Zaine, pela amizade, apoio, estímulo e valiosa troca de conhecimento durante o desenvolvimento da pesquisa.

À Universidade Federal do Maranhão e ao Departamento de Geociências pela oportunidade.

À CAPES pela bolsa PIBIC concedida.

A Universidade Federal do Pará, em especial ao Prof. Dr. Tony Carlos Dias da Costa do Laboratório de Física do Solo do Curso de Engenharia e ao Dr. Manoel Gomes de Moura da Universidade Estadual do Maranhão pelo apoio na realização dos ensaios de laboratório e valiosas discussões.

Aos professores da Universidade Estadual Paulista do Programa de Pós-graduação em Geociências e Meio Ambiente, Landim, Sturaro, Paulina, Cotas, Fowler, Edson, Braga, Cenira (Pós-geografia), pela importante contribuição aos conhecimentos adquiridos durante o período da tese.

Aos professores Dr. Lazaro Valentim Zuquette, Dr. Osni José Pejon e Dra. Denise Balestero pela valiosa contribuição e conselhos na 1ª fase do desenvolvimento da tese.

Aos colegas da pós-graduação da UNESP- Rio Claro, em especial Eymar Silva Sampaio Lopes, Paulo Cezar Araújo, Alessandro Ericeira, Ribamar Tavares Júnior e Susana Belen Corvalan nos trabalhos computacionais e com os quais tive oportunidade de conviver e trocar experiências.

À Luah Walsh, estudante de geologia pela maravilhosa colaboração nos trabalhos de fotointerpretação.

À Dra. Mariselma Ferreira Zaine, Jorge Luís Barreto e Damaris Miyashiro Kumayama pela revisão e brilhantes sugestões.

Aos alunos do curso de geografia DEGEO/UFMA, em especial ao Carlos Eduardo Muniz Abdala, e ao Sr. Luis Carlos Pereira Silva (motorista da UFMA), pela valiosa colaboração nas árduas jornadas dos trabalhos de campo.

Ao amigo José Cursino Barbosa pela confecção do Permeâmetro de Guelph modificado que auxiliou na etapa geral desta pesquisa.

Aos amigos Geólogos Hélio Costa, Eduardo Padilha e Jaguar pela sincera amizade e valiosas discussões, apoio e troca de conhecimento sobre a geologia e hidrogeologia da área.

Ao meu companheiro de jornada, Jorge Luiz, meus filhos, André Luiz e Daniel e a Luciana pelo apoio, compreensão, estímulo e incansável colaboração, que mesmo distantes, fortaleceram minha caminhada, imprescindíveis para o êxito deste trabalho.

Aos meus pais Benedito (*in memoriam*) e Antonia e aos meus irmãos (Antonio, Jary, Carlos, Paulo, Nazareth e Leomira) e Otilia por fazerem parte de minha vida.

Aos amigos de São Luís que freqüentam a minha casa, pela alegria de conhecê-los.

À todos que contribuíram de alguma forma para o êxito deste trabalho.

SUMÁRIO

ÍNDICE	i
ÍNDICE DE FIGURAS	v
ÍNDICE DE TABELAS	viii
ÍNDICE DE FOTOS	x
ÍNDICE DE APÊNDICES	xii
ÍNDICE DE ANEXOS	xiii
RELAÇÃO DE SIGLAS E ABREVIACÕES	xiv
RESUMO	xvi
ABSTRACT	xviii
I INTRODUÇÃO.....	1
II MÉTODOS E ETAPAS DE TRABALHO	5
• III CONCEITOS FUNDAMENTAIS	15
IV CARACTERIZAÇÃO DA BACIA	57
V APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS	76
VI CONSIDERAÇÕES FINAIS, CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	127
VII REFERÊNCIAS	131

ÍNDICE

ÍNDICE DE ILUSTRAÇÕES

RESUMO

ABSTRACT

I	INTRODUÇÃO.....	1
1.1	Premissas	3
1.2	Hipótese de trabalho.....	3
1.3	Objetivos	4
II	MÉTODOS E ETAPAS DE TRABALHO	5
2.1	Materiais utilizados e procedimentos	6
2.1.1	Principais fontes de pesquisa bibliográficas	6
2.1.2	Material cartográfico e aerofotos utilizados	6
2.1.3	Materiais cartográficos elaborados	7
2.1.4	Trabalho de campo	7
2.1.5	Análise e ensaios <i>in situ</i> e laboratoriais	9
2.1.6	Etapas de trabalho	10
III	CONCEITOS FUNDAMENTAIS	15
3.1	Bacias hidrográficas	15
3.1.1	Morfometria de bacia hidrográfica	15
3.1.2	Visão integrada da bacia hidrográfica	17
3.1.2.1	Legislação	18
3.2	Mapeamento Geotécnico	19
3.2.1	Objetivos e aplicações dos mapas geotécnicos	21
3.2.2	Metodologias utilizadas no Brasil	21
3.2.3	Metodologias geotécnicas internacionais	26
3.3	Dinâmica das águas	28
3.3.1	Distribuição e movimento da água no subsolo	28
3.3.2	Zona não Saturada ou Vadosa	29
3.3.3	Zona Saturada	33
3.3.4	Medidas de infiltração	33

3.3.5	Permeâmetro de Guelph	34
3.3.6	Infiltrômetro	36
3.4	Processos exógenos do meio físico	37
3.4.1	Erosão	37
3.4.1.1	Fatores condicionantes dos processos erosivos	39
3.4.1.1.1	Chuva	39
3.4.1.1.2	Solo	40
3.4.1.1.3	Topografia	40
3.4.1.1.4	Cobertura Vegetal	41
3.4.1.1.5	Substrato rochoso	42
3.4.2	Assoreamento	42
3.4.3	Enchente e inundação	43
3.4.4	Movimento gravitacional de massa	43
3.4.5	Subsidência e colapso	45
3.4.6	Alterações Tecnogênicas	45
3.4.7	Contaminação de água	47
3.5	Método de Avaliação da Vulnerabilidade	49
3.5.1	Método GOD	49
3.5.1.1	Aplicação do índice GOD de vulnerabilidade	51
3.5.2	Método DRASTIC	53
3.5.3	Método AVI.....	53
3.5.4	Método de sobreposição de mapas	54
IV	CARACTERIZAÇÃO DA BACIA	56
4.1	Localização	52
4.2	Histórico	57
4.3	Clima	59
4.4	Análise Morfométrica	63
4.5	Aspectos Geológicos	63
4.5.1	Formação Itapecuru	64
4.5.2	Terciário Paleogeno	65
4.5.3	Formação Barreiras	65
4.5.4	Formação Açuí	66
4.6	Geologia Estrutural	66

4.7	Geomorfologia	67
4.8	Aspectos Pedológicos	69
4.9	Hidrogeologia	73
V	APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS.....	75
5.1	Etapa Geral – Mapa geológico-geotécnico 1:20.000	75
5.1.1	Descrição das unidades geológico-geotécnicas – Etapa geral (esc: 1:20.000)	75
5.1.1.1	Unidade I - Depósitos construídos.....	78
5.1.1.2	Unidade II – Áreas planas de fundo de vales - Formação Açuí	78
5.1.1.2.1	Sub-Unidade II – A - Mangues	79
5.1.1.2.2	Sub-Unidade II – B – Planície Aluvionares	81
5.1.1.3	Unidade III – Terrenos associados a fácies arenosas da Formação Barreiras	83
5.1.1.3.1	Sub-unidade III – A – Fácies arenosa de Formação Barreiras em topo de tabuleiro	83
5.1.1.3.2	Sub-unidade III – B – Fácies arenosa da Formação Barreiras em situação de meia encosta.....	84
5.1.1.4	Unidade IV – Fácies areno-argilosa da Formação Barreiras	86
5.1.1.4.1	Sub-unidade IV – A - Área de ocorrência da fácies areno-argiloso da Formação Barreiras em topo de colina.....	86
5.1.1.4.2	Sub-unidade IV – B - Área de ocorrência da Fácies areno-argilosa da Formação Barreiras em meia encosta da colina.....	87
5.1.1.5	Unidade V – Área de domínio da Formação Terciário Paleogeno.....	88
5.1.1.5.1	Sub-unidade V-A - Área de ocorrência da Formação Terciário Paleogeno em topo de colinas de altitudes 5 a 20 metros.....	89
5.1.1.5.2	Sub-unidade V-B - Área de ocorrência da Formação Terciário Paleogeno em situação de média e baixa encosta	90
5.1.1.6	Unidade VI – Domínio da Formação Itapecuru	91
5.2	Etapa de Semi-Detalhe (2ª etapa) – 1:10.000	94
5.2.1	Carta de Declividade	96
5.2.2	Carta de Profundidade do nível de água subterrâneo e da superfície potenciométrica do aquífero livre	97

5.2.3	Descrição das unidades de cobertura de materiais inconsolidados	102
5.2.3.1	Unidade I – Arenosa	102
5.2.3.2	Unidade II – Laterítica	109
5.2.3.3	Unidade III – Laterita Coluvial	116
5.2.3.4	Unidade IV – Argila Mosqueada	118
5.2.3.5	Unidade V – Aluvionar	119
5.2.4	Carta de uso e ocupação do solo.....	121
5.3	Avaliação da vulnerabilidade natural à contaminação do solo e da água subterrânea do reservatório Batatã - Etapa de semi-detalle (2ª etapa)	123
5.3.1	Carta de Vulnerabilidade natural à contaminação do solo e do aquífero do Reservatório Batatã e entorno.....	125
5.3.2	Carta de Vulnerabilidade natural e de potencial de contaminação do solo e da água subterrânea do Reservatório Batatã e entorno.....	125
VI	CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÕES	127
6.1	Considerações Finais.....	127
6.2	Conclusões	128
6.3	Recomendações	130
VII	REFERÊNCIAS	131

ÍNDICE DE ILUSTRAÇÕES

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Seqüência das etapas de trabalho realizadas nesta pesquisa	5
Figura 2 - Estratégia metodológica da análise de vulnerabilidade natural à contaminação do solo e do aquífero do Reservatório Batatã.	8
Figura 3 - Técnica de avaliação do terreno (modificado COOKE e DOORKAMP, 1990 Apud LOLLO e ZUQUETTE, 1996).	25
Figura 4 - Distribuição de água no subsolo (adaptado de KARMANN, 2001).	28
Figura 5 - Zonas do processo de infiltração (BRANDÃO, PRUSK, SILVA, 2002).	30
Figura 6 - Evolução da taxa de infiltração com o tempo (REICHARDT, 1990).	31
Figura 7 - Conceituação do movimento de água no perfil de solo (EPA, 1998).	31
Figura 8 - Esquema do Permeômetro de Guelph (MACHADO, 2004).	35
Figura 9 - Representação esquemática de um infiltrômetro de anel (REICHARDT, 1990).	36
Figura 10 - Tipos de erosão (ALMEIDA FILHO, 2000).	38
Figura 11 - Classificação espacial das encostas (SOARES e FIORI, 1976).	41
Figura 12 - Tipos de leitos fluviais (CHRISTOFOLETTI, 1980).	44
Figura 13 – Seqüência das fases do método GOD para avaliação da vulnerabilidade natural a contaminação das águas subterrânea, adaptada (FOSTER et al. 2002).	52
Figura 14 - Mapa de localização da Bacia do Rio Bacanga.	56
Figura 15 - Altura pluviométrica anual – 1993/2002.	60
Figura 16 - Altura pluviométrica mensal – período chuvoso.	61
Figura 17 - Altura pluviométrica mensal – período seco.	61
Figura 18 - Registro do comportamento do suprimento de água no solo.	62
Figura 19 - Freqüência mensal de dias chuvosos.	62

Figura 20 - Coluna estratigráfica da Bacia de São Luís (adaptado de RODRIGUES et al.,1994).	64
Figura 21 - Compartimentação geomorfológica do relevo maranhense (adaptado de RADAMBRASIL, 1973).	69
Figura 22 - Mapa pedológico da Bacia do Rio Bacanga (adaptado de MARANHÃO, 1998b).	71
Figura 23 - Perfil laterítico imaturo característico da área de estudo (RODRIGUES et al.,1994).	72
Figura 24 - Seções esquemáticas da distribuição espacial das unidades geológicas-geotécnicas (associação do substrato geológico e o relevo).	76
Figura 25 - Modelo Numérico do Terreno da Bacia Hidrográfica do Rio Bacanga.	77
Figura 26 - Mapa de situação da área de semi-detelhe junto ao Reservatório Batatã na Bacia do Bacanga.	94
Figura 27 - Representação do modelo numérico do terreno (3D) da área de semi-detelhe. do Reservatório Batatã.	95
Figura 28 - Carta da superfície potenciométrica do aquífero livre Barreiras - Etapa de semi-detelhe.	99
Figura 29 - Análise de agrupamento entre as durações de chuva.	101
Figura 30 - Curva de volume de infiltração em área vegetada na unidade I.	105
Figura 31 - Curva de velocidade da infiltração em área vegetada na unidade I.	105
Figura 32 - Rebaixamento versus $\log(t)$ da área vegetada (I - 2) da unidade I.	106
Figura 33 - Rebaixamento versus $\log(t)$ da área vegetada (I - 5) da unidade I.	106
Figura 34 - Curva de volume de infiltração (I - 7) em área sem vegetação na unidade I.	107
Figura 35 - Curva de velocidade da infiltração (I - 7) em área sem vegetação na unidade I.	107
Figura 36 - Rebaixamento versus $\log(t)$ da área sem vegetação (I - 7) da unidade I.	108
Figura 37 - Curva de infiltração em área vegetada da unidade II.	113
Figura 38 - Curva de velocidade de infiltração em área vegetada da unidade II.	113

Figura 39 - Rebaixamento versus $\log (t)$ da área vegetada (I - 3) da unidade I.	114
Figura 40 - Rebaixamento versus $\log (t)$ da área vegetada (I - 6) da unidade I.	114
Figura 41 - Curva de volume de infiltração (I - 4) em área com vegetação na unidade II.	115
Figura 42 - Curva de velocidade da infiltração (I - 4) em área com vegetação na unidade II.	115
Figura 43 - Rebaixamento versus $\log (t)$ da área vegetada (I - 4) da unidade I.	115

Tabela 1 - Os limites granulométricos adotados (conforme NOGUEIRA, 1975).	10
Tabela 2 - Termos utilizados na cartografia geotécnica (ZUQUETTE 1987, 1993).	21
Tabela 3 - Principais objetivos, aplicações e usuários das cartas geotécnicas (modificado de CERRI, 1990).	22
Tabela 4 - Síntese das etapas do método do detalhamento progressivo, (CERRI et al., 1996).	24
Tabela 5 - Mapeamentos geotécnicos enfocando as cartas de vulnerabilidades e potencialidades.	25
Tabela 6 - Formas de análise e quantificação para as classes hierárquicas na metodologia PUCE (ZUQUETTE E GANDOLFI, 2004).	27
Tabela 7 - Critério de classificação de infiltração básica, Reichardt (1990).	37
Tabela 8 - Correlação entre os processos naturais e Tecnogênicos (conforme TER STEPANIAN 1988).	46
Tabela 9 - Classe de vulnerabilidade de contaminação de aquífero (FOSTER et al., 2002).	50
Tabela 10 - Classe de vulnerabilidade do índice AVI (VAN STEMPVOORT et al., 1992).	54
Tabela 11 - Dados sobre poços tubulares e escavados da área do Reservatório Batatã.	98
Tabela 12 - Intensidade e duração de chuvas – Estação Tirirical.	101
Tabela 13 - Índices físicos dos materiais inconsolidados da unidade I.	104
Tabela 14 - Índices de consistência dos materiais inconsolidados da unidade I.	104
Tabela 15 - Índices físicos dos materiais inconsolidados da unidade II.	111
Tabela 16 - Índices de consistência dos materiais inconsolidados da unidade II.	111

Tabela 17 - Índices granulométricos dos materiais inconsolidados da unidade III. **118**

Tabela 18 - Avaliação da vulnerabilidade natural à contaminação do solo e aquíferos através do Método GOD. **124**

ÍNDICE DE FOTOS

Foto 1 - Vista parcial do Reservatório Batatã (Prefeitura Municipal,2002). **58**

- Foto 2** - Vista geral da unidade I, com detalhe de alagamento na Av. dos Africanos, após chuva intensa (Ponto G-160, Apêndice A). **79**
- Foto 3** - Vista parcial do manguezal na Barragem do Bacanga (Ponto – G -143, Apêndice A). **80**
- Foto 4** - Trecho do Rio das Bicas intensamente assoreado, (Ponto G – 150, Apêndice A). **81**
- Foto 5** - Vista parcial da planície aluvionar do Rio da Prata (Ponto G-50, Apêndice A) (Ponto G- 87, Apêndice A). **82**
- Foto 6** - Vista parcial das palmáceas, vegetação característica das áreas úmidas do Rio Maracanã (Ponto G- 87, Apêndice A). **82**
- Foto 7** - Vista parcial do topo do tabuleiro da unidade III - A (PONTO – I - 7, Apêndice C). **84**
- Foto 8** - Concreções lateríticas que sustentam o tabuleiro da unidade III – B (Ponto – G – 81, Apêndice A). **85**
- Foto 9** - Registro de retirada de lateritas da sub-unidade III – B, na área da Bacia do Rio Bacanga (Ponto – G – 74, Apêndice A). **85**
- Foto 10** - Vista parcial do topo da colina da sub-unidade IV-A (Ponto G-31, Apêndice A). **86**
- Foto 11** - Vista de detalhe dos sedimentos areno-argilosos da sub-unidade IV –A (Ponto G-31, Apêndice A). **87**
- Foto 12** - Sedimentos areno-argilosos intensamente mosqueados da sub-unidade IV- B (Ponto G-23, Apêndice A). **88**
- Foto 13** - Lentes de caulinita na base do afloramento (Ponto G- 144, Apêndice A) da sub-unidade V - A. **89**
- Foto 14** - Vista de detalhe dos argilitos arroxeados intensamente mosqueados da sub-unidades V - A (Ponto G – 137, Apêndice A). **90**
- Foto 15** - Detalhe das manchas esbranquiçadas nas rochas da unidade VI, na base da falésia do Bomfim (Ponto G - 3, Apêndice A). **91**
- Foto 16a**- Vista em detalhe da estratificação cruzada da rocha da unidade VI da Formação Itapecuru (Ponto G - 3, Apêndice A). **92**
- Foto 16b**- Vista parcial dos sulcos na unidade VI da Formação Itapecuru (Ponto G- 139, Apêndice A). **93**
- Foto 17** - Perfil de alteração dos materiais arenosos da unidade I no topo do tabuleiro (ponto PB - 22, Apêndice C). **103**

Foto 18 - Detalhe da camada superficial com selamento da unidade I (Ponto I – 7 Apêndice C) .	109
Foto 19 - Detalhe da laterita da unidade de materiais inconsolidado II (Ponto PB - 02, Apêndice C).	110
Foto 20 - Vista parcial das intercalações das camadas de laterita com horizontes arenosos (Ponto PB - 11, Apêndice C).	111
Foto 21 - Detalhe da laterita envolvida por matriz areno-argilosa (Ponto I – 5, Apêndice C).	111
Foto 22 - Material inconsolidado arenoso da unidade III (Ponto PB – 32, Apêndice C).	117
Foto 23 - Feições erosivas como pedestais e lateritas dispersas (Ponto PB - 15, Apêndice C).	117
Foto 24 - Presença de sulcos na unidade III (Ponto PB - 15, Apêndice III).	118
Foto 25 - Material residual intensamente mosqueado da unidade IV (Ponto PB -17, Apêndice C).	119
Foto 26 - Vista parcial do depósito aluvionar presente no Rio Batatã (Ponto PB- 48, Apêndice 3).	120
Foto 27 - Banheiro improvisado na área de recarga do tabuleiro (Ponto PB – 45, Apêndice C).	122
Foto 28 - Exposição de lixo no Vale do Rio Batatã (Ponto PB – 23, Apêndice C).	122

ÍNDICE DE APÊNDICES

Apêndices A - Mapa de pontos – Etapa Geral

Apêndices B - Mapa geológico-geotécnico– Etapa Geral

Apêndices C - Mapa de pontos – Etapa Semi-detalle

Apêndices D - Carta de declividade – Etapa Semi-detalle

Apêndices E - Carta de profundidade de N.E. – Etapa Semi-detalle

Apêndices F - Carta de materiais inconsolidados – Etapa Semi-detalle

Apêndices G - Carta de uso e ocupação – Etapa Semi-detalle

Apêndices H - Carta de vulnerabilidade – Etapa Detalle

Apêndice I - Curvas granulométricas do material inconsolidado da unidade I.

Apêndice J - Análises granulométricas das amostras do material inconsolidado da unidade I.

Apêndice L - Limites de liquidez dos materiais inconsolidados da unidade I.

Apêndice M - Determinação da curva do volume e velocidade de infiltração pelo método do infiltrômetro, Infiltração (I - 2).

Apêndice N - Determinação da curva do volume e velocidade de infiltração pelo método do infiltrômetro Infiltração (I - 5).

Apêndice O - Determinação da curva do volume de infiltração pelo método do infiltrômetro Infiltração (I - 7).

Apêndice P - Curvas granulométricas das amostras do material inconsolidado da unidade II.

Apêndice Q - Análises granulométricas do material inconsolidado da unidade II.

Apêndice R - Limites de liquidez dos materiais inconsolidados da unidade II.

Apêndice S - Determinação da curva do volume e velocidade de infiltração pelo método do infiltrômetro Infiltração (I - 3).

Apêndice T - Determinação da curva do volume e velocidade de infiltração pelo método do infiltrômetro Infiltração (I - 6).

Apêndice U- Determinação da curva do volume e velocidade de infiltração pelo método do infiltrômetro - Infiltração (I - 4).

Apêndice V - Determinação da curva do volume e velocidade de infiltração pelo método do infiltrômetro Infiltração (I - 1).

Apêndice X - Curvas granulométricas das amostras de material inconsolidado da unidade III.

Apêndice Z - Análises granulométricas do material inconsolidado da unidade III.

ANEXO A - Desmatamento ameaça o Batatã.

ANEXO B - Diversas notícias da cidade de São Luis.

ANEXO C - Risco de racionamento no Reservatório Batata.

ANEXO D – Reserva do Batatã no limite.

RELAÇÃO DE SIGLAS E ABREVIACÕES

ABGE – Associação Brasileira de Geologia de Engenharia

ABNT- Associação Brasileira de Normas Técnicas
ALUMAR - Alumínio do Maranhão
ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica
APA - Área de Preservação Ambiental
AVI - Índice de Vulnerabilidade do Aquífero
CAEMA - Companhia de Água e Esgoto do Maranhão
CPRM - Companhia de Pesquisa e Recursos Minerais
CVRD - Companhia Vale do Rio Doce
DNOS - Departamento Nacional de Obras e Saneamento
DSG - Departamento de Serviço Geográfico
EESC - Escola de Engenharia de São Carlos
EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
EPA - *Environmental Protection Agency*
GERCO – Gerenciamento Costeiro
GOD - Groundwater occurrence, Overall lithology of the zone unsaturated zone, Depth to the water table
IAEG - *International Association of Engineering Geology*
IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IGCE – Instituto de Geociências e Ciências Exatas
INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IPT - Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo
LNEC - Laboratório Nacional de Engenharia Civil
MNT - Modelo Numérico do Terreno
N.A. - Nível de Água
N.E. - Nível Estático
PUCE - *Pattern, Unit, Component, Evaluation*
SEMA-MA - Secretaria Estadual de Meio Ambiente do Maranhão
UFMA - Universidade Federal do Maranhão
UFSC – Universidade Federal São Carlos
UNESCO - Organização das Nações Unidas para Educação, a Ciência e a Cultura
UNESP - Universidade Estadual Paulista
USP - Universidade de São Paulo

RESUMO

O mapeamento geológico-geotécnico em áreas urbanas foi utilizado na análise das características do meio físico e processos geológicos, avaliando suas limitações e potencialidades como subsídio à gestão e ao planejamento municipal. A Bacia do Rio Bacanga, localizada na Ilha do Maranhão, no município de São Luís-Maranhão (Brasil), apresenta uma área de 106 km² que através dos tempos vem passando por um dinâmico processo de ocupação de forma não planejadas, provocando diversos impactos ambientais como assoreamento dos mangues, desmatamentos, aterramentos, impermeabilizações do solo, erosão, contaminação da água, inundações e outros. Os recursos hídricos genuinamente ludovicenses são estratégicos para a Ilha oceânica, como reservas que precisam ser preservadas por se tratar de um ecossistema frágil. O estudo foi realizado através do método do detalhamento progressivo (análise do geral para o particular) para determinação e avaliação de áreas vulneráveis a contaminação do solo e da água no Reservatório Batatã. Na etapa geral do método foi elaborado o mapa geológico-geotécnico na escala 1:20.000 onde foram individualizadas 6 unidades no terreno. Na etapa de semi-detalle a pesquisa se direcionou para o estudo da vulnerabilidade natural à contaminação do solo e aquífero do Reservatório Batatã e entorno. Nesta etapa, os estudos enfocaram uma área de 6,6 km², para a qual foram geradas cartas na escala de 1:10.000: de declividade, de profundidade do nível de água subterrânea, de superfície potenciométrica do aquífero livre Barreiras, de material inconsolidado e de uso e ocupação do solo. Nesta etapa, utilizou-se o método de avaliação da vulnerabilidade natural GOD utilizando-se as informações das cartas de unidades de material inconsolidado e da profundidade do nível de água subterrânea sendo gerado o mapa de vulnerabilidade natural à contaminação do solo e do aquífero e superpondo as informações com a carta de uso e ocupação do solo foi elaborada de forma conjugada a Carta de vulnerabilidade natural e de potencial à contaminação do solo e aquífero do Reservatório Batatã. Com esta avaliação foram definidas áreas de extrema, alta, moderada e baixa vulnerabilidade natural a contaminação do solo e do aquífero. As áreas de extrema vulnerabilidade situam-se na borda do Reservatório Batatã. As porções de topo e alta encosta do tabuleiro compreendem as zonas de alta vulnerabilidade natural, localizadas junto ao divisor de águas (área urbana e rodovia) sendo consideradas como de alto potencial de contaminação.

Palavras Chaves – Reservatório Batatã, mapeamento geológico-geotécnico, detalhamento progressivo, área de recarga, vulnerabilidade à contaminação, infiltração.

ABSTRACT

The geological-geotechnical mapping in urban areas was used in the analysis of the environment characteristics and geological processes, evaluating its limitations and potentialities as subsidy to the municipal management and planning. The Basin of the river Bacanga is located in the Maranhão Island, in the city of São Luís – Maranhão (northeast of Brazil) and presents an area of 106 km². It has been passing through a dynamic process of non-planned human occupation which has caused many impacts as mangroves landfill environmental in region, deforestation, ground waterproofing, erosion, water contamination, flooding and others. Local water resources constitute a fragile ecosystem but a strategic one for such an oceanic island. Therefore, it must be preserved. The study was done through the method of the gradual detailing (it analyzes first the general aspects and afterwards the specific ones) for determination in the Batatã Reservoir.

On the first and most general step, a 1:20.000 scale geologic-geotechnical map was made, on where six land units were set up. The semi-detailed step studied the natural vulnerability to ground and aquifer contamination of the Batatã Reservoir and its surroundings. Such stage focused a 6.6 km² area for which 1:10.000 scale charts were generated: declivity, underground water level depth, potentiometric surface, unconsolidated material and ground occupation. At this phase, the GOD natural vulnerability evaluation approach was used, and then information from the land unit charts of unconsolidated material and underground water level depth was utilized, resulting a map of natural vulnerability concerned to the contamination of ground and aquifer. The map of ground occupation was overlapped on the natural vulnerability map, resulting a map of natural vulnerability and potential contamination of the ground and aquifer of the Batatã Reservoir. Due to this evaluation, areas of extreme, high, moderate and low natural vulnerability to contamination of ground and aquifer were defined. The extreme vulnerable areas are on the gutter of Batatã Reservoir. The parts on the top hill and top hillside correspond to high natural vulnerability zones, and they are located on the water boundings (urban area and highways), being considered as high contamination potential ones.

KEYS WORD: geologic-geotechnical mapping, gradual detailing, recharge water area, vulnerability natural, infiltration.

I INTRODUÇÃO

Nas últimas três décadas, o crescimento populacional e o desenvolvimento sócio-econômico têm se intensificado no país. O uso intensivo e não planejado do solo tem provocado vários níveis de degradação ambiental, principalmente do solo e dos recursos hídricos.

O homem vem ocupando os espaços geográficos indiscriminadamente, sem o prévio conhecimento de suas vulnerabilidades e potencialidades. As características naturais do solo podem ser alteradas por diversas atividades como os assentamentos urbanos e rurais, instalações industriais, agricultura, mineração, obras de infra-estrutura, área de recreação e outras.

O uso inadequado do solo promove uma série de impactos negativos no meio físico gerando degradação, como por exemplo: erosão acelerada, assoreamento dos cursos de água, diminuição do volume de água, contaminação das águas superficiais e subterrâneas e aumento de impermeabilização no solo. Este conjunto de processos acelerados e induzidos pela ação antrópica pode alterar, significativamente, a dinâmica natural da água em bacias hidrográficas.

A água, considerada um solvente universal, apresenta alta vulnerabilidade natural à contaminação tendo capacidade de diluir uma grande quantidade dos elementos químicos encontrados na natureza.

Segundo Marques (2005), nos últimos 10 anos, a contaminação da água quintuplicou e existem mais de 20 mil áreas contaminadas, com populações expostas a riscos de doenças, constando como principais fontes de poluição, o despejo de material tóxico proveniente das atividades agroindustriais e industriais, os esgotos urbanos e rurais *in natura* e os lixões.

A busca por água subterrânea de boa qualidade tem se intensificado. Vários núcleos urbanos como residências, indústrias, escolas, hospitais e outros são abastecidos com água de poços tubular e escavados de forma regular ou complementar.

O Governo tem adotado medidas para proteger as áreas verdes, dotadas de valor ecológico e cultural, por meio da definição e implantação de unidades de conservação como Parques, Reservas Ecológicas e Áreas de Proteção Ambiental (APA), principalmente em áreas

estratégicas para preservação dos mananciais, como no caso de ilhas oceânicas, consideradas um ecossistema frágil.

Na Ilha do Maranhão, em especial na Bacia do Rio Bacanga, foi criado o Parque Estadual do Bacanga, pelo Decreto Estadual nº 7.545 (MARANHÃO, 1980), com uma área de 3.065 ha, sendo considerado uma importante reserva verde. O Parque tem uma rica biodiversidade e importância estratégica na preservação dos mananciais. Na área foram instalados 11 poços tubulares do Sistema Sacavém e o Reservatório de Água do Batatã, responsável por 20% do abastecimento de água da população da cidade de São Luís.

Outra fonte de abastecimento de água na ilha é pela captação das águas superficiais do Rio Itapecuru, através do Sistema Italuís, Sistema Cururuca, Sistema Olho D'Água, e pelas captações subterrânea Paciência, Maiobão, Cidade Operaria e Sistemas de Poços Isolados, que fornecem água potável para 80% da população ludovicense. O Rio Itapecuru nasce no sul do Estado do Maranhão e atravessa 44 municípios até sua foz na Baía de São José.

O sistema de abastecimento de água de São Luís é abastecido pelo sistemas de captação superficial e subterrâneas fornecendo um volume total de água tratada de 10.278.062.05 m³ (CAEMA, 2004). O município de São Luis conta com uma melhor distribuição de serviços de abastecimento de água através da rede geral com 159.282 domicílios atendidos e 16.669 abastecidos por poços ou nascente (IBGE, 2000). Todavia, existem bairros que apresentam problemas de falta de abastecimento de água como Gapara, Alto da Esperança e outros.

Os recursos hídricos têm se tornado cada vez mais escassos, pois a ilha apresenta uma densidade demográfica em torno de 800 hab/km² (IBGE, 2000), e seus espaços estão sendo preenchidos, muitas vezes, sem prévio conhecimento das características do meio.

Para orientar o desenvolvimento sócio-econômico da região são necessários estudos específicos de caracterização do meio, dentre os quais pode ser aplicados, o mapeamento geológico-geotécnico e a avaliação da vulnerabilidade natural à contaminação do solo e do aquífero. Estas ferramentas são de grande importância para o gestor municipal e estadual para subsidiar o planejamento de uso e ocupação do solo urbano.

O mapeamento geotécnico ou geológico-geotécnico integra as informações do meio físico nas diversas áreas do conhecimento das geociências, fornecendo dados dos processos e

fenômenos que ocorrem no meio físico e permite a geração de documentos cartográficos denominados de mapas geotécnicos.

Segundo Zuquette e Gandolfi (2004), o mapeamento geotécnico é um processo que busca avaliar e retratar as características dos componentes do meio físico, bem como os possíveis comportamentos frente às diferentes formas de uso do solo, processos naturais e induzidos

A cartografia geotécnica vem sendo desenvolvida no Brasil desde 1960, na maioria das vezes, empregada para prevenir problemas ambientais provenientes de obras civis sem o prévio conhecimento das vulnerabilidades e potencialidades do meio físico e no planejamento urbano.

Dentre os métodos de mapeamento ou cartografia geotécnica ou geológico-geotécnica pode ser citado o Método do Detalhamento Progressivo (CERRI et al., 1996), que se desenvolve em três etapas sucessivas, do geral para o particular, com um aumento gradual de escalas de mapeamento, sendo utilizado, geralmente, no estudo de problemas específicos. Para o desenvolvimento do presente estudo, utilizou-se este método.

1.1 Premissas

- As reservas de água subterrâneas com o passar dos anos vêm sofrendo degradação causado pelo aumento das áreas impermeabilizadas e pelas diversas atividades humanas capaz de produzir diversos potenciais de contaminação nesses recursos;
- O conhecimento das características do meio físico através da aplicação do detalhamento progressivo é de grande importância para o entendimento dos processos geológicos e problemas ambientais;
- A determinação dos índices de avaliação da vulnerabilidade natural é de relevância para o planejador como subsídio ao planejamento do uso e ocupação do solo urbano;

1.2 Hipótese de trabalho

A partir dos aspectos abordados é apresentada a seguinte hipótese de trabalho:

- O método do detalhamento progressivo que trata da elaboração de cartas e mapas geotécnicos de áreas urbanas em escalas crescentes, do geral para o particular, pode ser aplicado para definir o zoneamento da vulnerabilidade e do potencial de contaminação do solo e do aquífero, como subsídio ao planejamento e gestão do uso do solo urbano.

1.3 Objetivos

Os objetivos formulados para o desenvolvimento deste trabalho são os seguintes:

- Avaliar e cartografar a vulnerabilidade natural e o potencial à contaminação do solo e do aquífero da área do Reservatório Batatã e entorno, utilizando o método do detalhamento progressivo;
- Apresentar documentos cartográficos que permitam aos órgãos governamentais estabelecerem dispositivos legais e medidas especiais em áreas protegidas por lei, para preservação e conservação das áreas vulneráveis à contaminação dos recursos hídricos.
- Integrar as informações geológicas-geotécnicas e hidrogeológicas em uma linguagem acessível para serem difundidas nos órgãos públicos como subsídio para orientar políticas públicas direcionadas ao planejamento territorial.

II MÉTODO E ETAPAS DE TRABALHO

Neste item é apresentada a descrição dos materiais e procedimentos utilizados, além das etapas empregadas no desenvolvimento do trabalho, para melhor identificação das condições geológicas-geotécnicas, de modo a possibilitar a caracterização do meio físico na área estudada.

Na Figura 1 encontra-se a estratégia metodológica adotada para análise da vulnerabilidade natural à contaminação do solo e aquífero do Reservatório Batatã – MA.

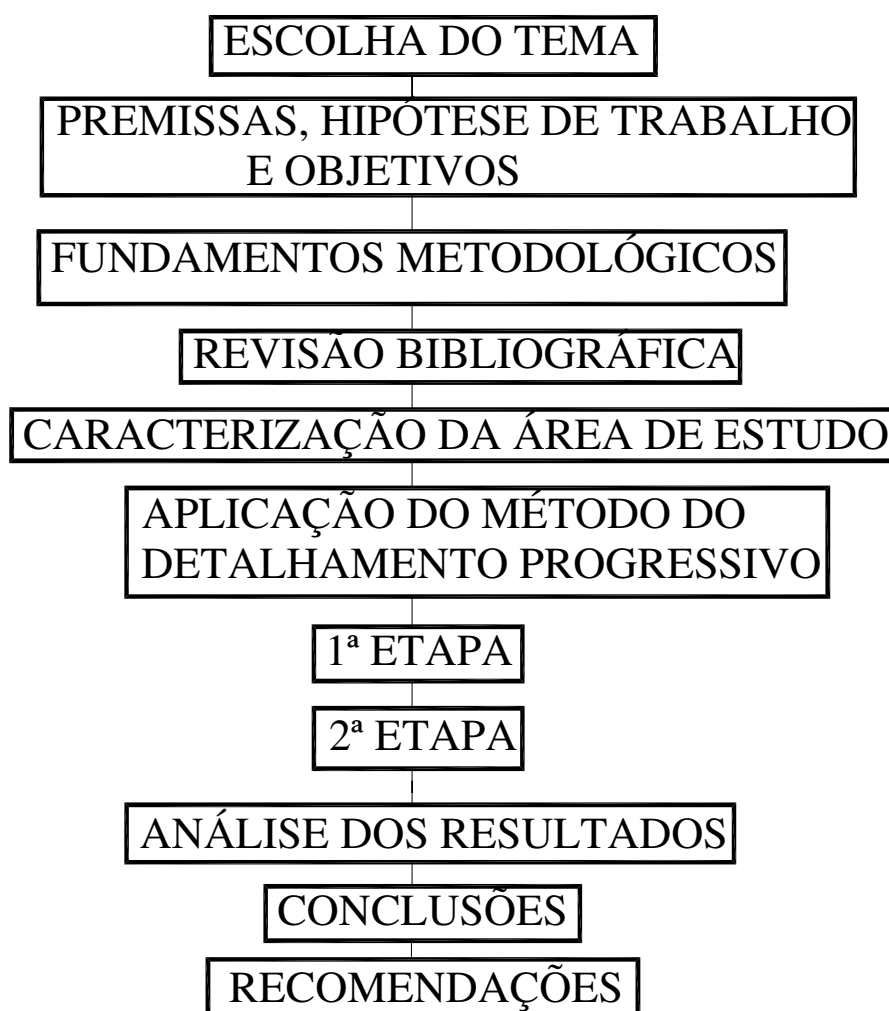


Figura 1 – Seqüência das etapas de trabalho realizadas nesta pesquisa.

2.1 Materiais utilizados e procedimentos

A realização dessa pesquisa contou com a utilização de materiais cartográficos, fotointerpretação, sucessivas etapas de campo, análise laboratorial, ensaio *in situ*, elaboração de cartas temáticas utilizando o método do detalhamento progressivo e de uma avaliação da vulnerabilidade natural empregando o método GOD para área do Reservatório Batatã e entorno.

2.1.1 Principais fontes de pesquisa bibliográficas

O principal acervo bibliográfico pesquisado pertence às bibliotecas da Universidade Estadual Paulista (UNESP/Rio Claro), Universidade de São Paulo (USP/São Carlos) e da Divisão de Geologia do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT), Universidade Federal do Maranhão (UFMA) e Secretaria Estadual de Meio Ambiente do Maranhão (SEMA – MA).

2.1.2 Material cartográfico e aerofotos utilizados

Os mapas planialtimétricos utilizados foram elaborados pela Diretoria de Serviços Geográfico (DSG, 1980), na escala de 1:10.000, especificamente nas Folhas 21, 22, 23, 29, 30, 31, 37, 38 e 39.

A fotointerpretação foi realizada com o auxílio de três jogos de fotos aéreas:

- Fotografias aéreas, na escala de 1:8.000, ano de 1988, provenientes de levantamentos executados pela Aerodata Base para a Companhia de Água e Esgoto do Maranhão (CAEMA, 1988);

- Fotografias aéreas, na escala de 1:15.000, provenientes do levantamento realizado pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE, 1989);

- Fotografias aéreas na escala de 1:8.000, ano de 2002, disponibilizadas por meio do levantamento aerofotogramétrico realizados pela empresa Aeroconsulte para a Prefeitura Municipal de São Luís (PREFEITURA MUNICIPAL DE SÃO LUÍS, 2002).

Os dois primeiros jogos foram cedidos pela Secretaria Estadual de Meio Ambiente (SEMA-MA) e o último, pela Prefeitura Municipal de São Luís.

2.1.3 Materiais cartográficos elaborados

Foram elaborados os seguintes mapas e cartas, conforme as sucessivas etapas do método de mapeamento progressivo (Figura 2).

Na primeira etapa (geral) foi elaborado o mapa topográfico que, associado aos trabalhos de campo e de foto-interpretação, forneceu subsídios à elaboração do mapa geológico-geotécnico na escala de 1:20.000. O Modelo Numérico do Terreno (MNT) foi elaborado no programa Arc GIS versão 8.0 (ESRI, 2001) e auxilia na visão espacial do relevo da bacia. Na 2ª fase (semi-detalle) foram elaboradas, na escala de 1:10.000, as cartas de declividade, profundidade do nível de água subterrânea, carta da superfície potenciométrica do Aquífero Livre Barreiras, carta de cobertura de materiais inconsolidados, carta de uso e ocupação do solo e a carta de vulnerabilidade natural e de potencial à contaminação do solo e aquífero do Reservatório Batatã. Todas as cartas foram digitalizadas no Auto CAD Map 2000i (AUTODESK, 2001).

2.1.4 Trabalhos de campos

Os trabalhos de campo buscaram caracterizar as diferentes formações geológicas e os processos envolvidos, conforme o método do detalhamento progressivo. Na primeira etapa, realizou-se a coleta de dados em uma área de 106 km², na escala de 1:20.000, onde foram realizadas as observações dos pontos estudados, distribuídos com uma densidade de 2.0 pontos por km² que permitiu uma melhor representatividade da área. As observações foram realizadas em afloramentos existentes em cortes de vias, voçorocas, drenagens, escavações e outros.

O método utilizado na caracterização das unidades foi a descrição tátil-visual, destacando-se os aspectos locacionais, geomorfológicos, litológicos, texturais, mineralógicos e estruturais, uso e ocupação atual, perfil de alteração, processos e problemas ambientais registrados na área, como erosão, assoreamento e outros.

Foi realizado um levantamento preliminar da permeabilidade das unidades geológicas-geotécnicas, utilizando o Permeâmetro de Guelph modificado. O método envolve medidas da razão do estado de equilíbrio da recarga da água dentro do solo não saturado a partir de um poço cilíndrico, no qual a profundidade da água (carga constante) é mantida, conforme Reynolds e Elrick (1985).

A profundidade do nível de água subterrânea foram fornecidos a partir de dados de poços tubulares e escavados de propriedade da CAEMA e de particulares, respectivamente. As informações podem ser visualizadas na Carta de Pontos Observados.

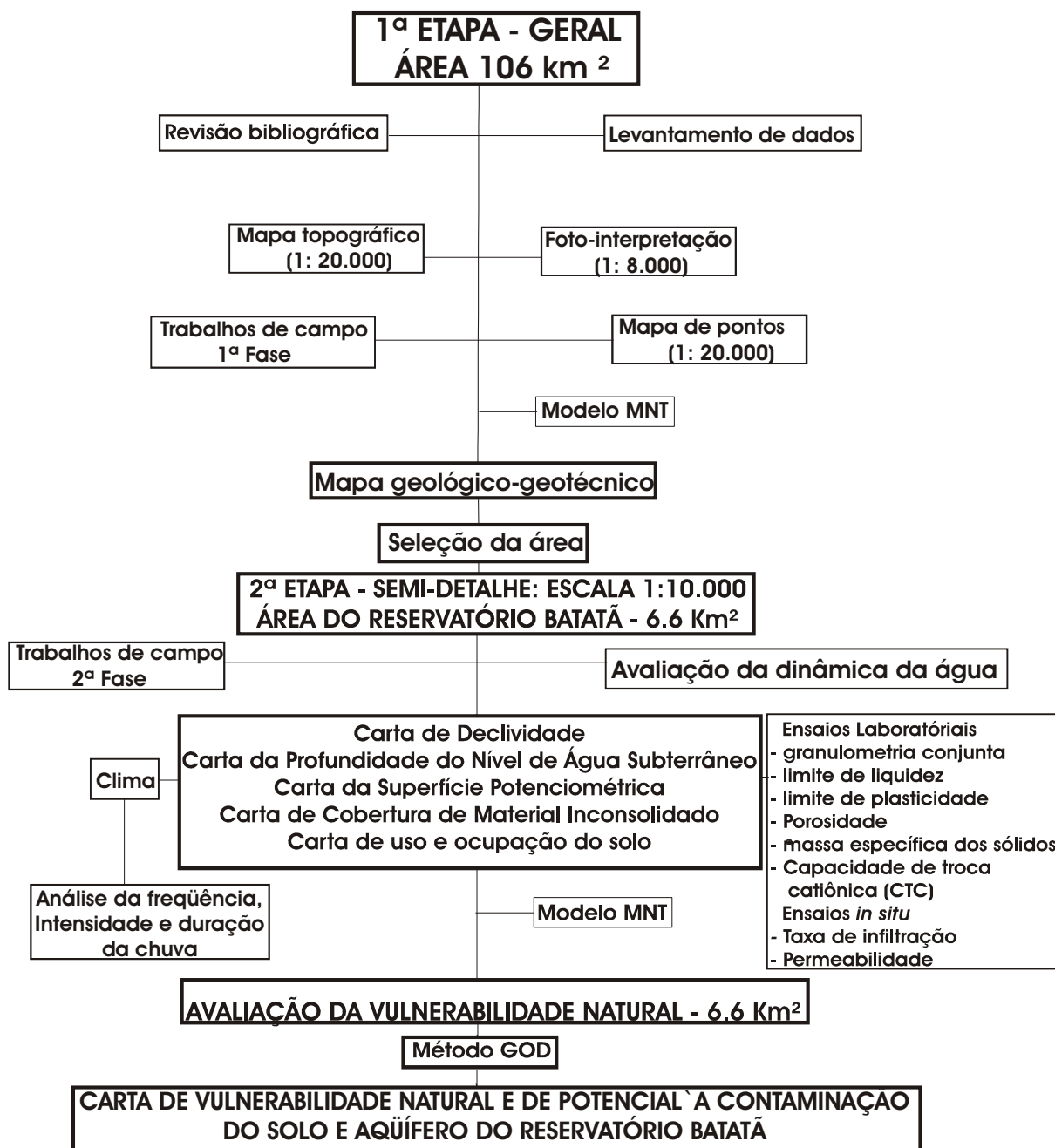


Figura 2 - Estratégia metodológica da análise de vulnerabilidade natural à contaminação do solo e aquífero do Reservatório Batatã.

Na 2ª etapa dos trabalhos, a área foi reduzida para uma área de 6,6 km² e mapeada na escala de 1:10.000. Conforme o objetivo do trabalho, a malha de observações foi adensada para 10 pontos por km², para melhor detalhamento das observações da 1ª etapa. As observações foram realizadas em afloramentos, voçorocas e drenagens, principalmente na porção norte do Reservatório Batatã.

Foram realizadas observações da cobertura de materiais inconsolidados, litologia, espessura, profundidade do nível de água subterrâneo, descrição de perfil de alteração, uso do solo, e os registros dos processos e problemas ambientais. Foram feitas coletas de amostras deformadas e indeformadas para determinação dos parâmetros geotécnicos no laboratório, conforme Nogueira (1995) e ensaios *in situ* para determinação da permeabilidade, utilizando o método do infiltrômetro de duplo anel. Neste método, utiliza-se dois cilindros concêntricos de 30 e 60 cm de diâmetros, que são cravados no solo a aproximadamente 10 cm. As medidas são feitas no cilindro central e o cilindro externo é utilizado para diminuir o efeito de bordadura, Reichardt (1990).

2.1.5 Análises e ensaios *in situ* e laboratoriais

Foram realizados vários ensaios para determinação das unidades geotécnicas, conforme as especificações da Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT, no Laboratório de Solos do Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Pará, discriminados a seguir:

- Granulometria conjunta (Tabela 1) - NBR – 7181/84 (ABNT, 1984);
- Massa específica dos sólidos - NBR – 6508 (ABNT, 1984);
- Limite de consistência - NBR – 6459 (ABNT, 1984);
- Limite de plasticidade - NBR – 7180 (ABNT, 1984);
- Capacidade de Troca de Cátions – CTC – Método do Azul de Metileno (conforme PEJON, 1992);
- Índices físicos do solo, conforme Nogueira (1995) e Pinto (2002);
- Taxa de infiltração e condutividade hidráulica – Método do infiltrômetro de duplo anel (REICHARDT, 1990). Este ensaio foi realizado *in situ*.

Tabela 1 - Os limites granulométricos adotados (conforme NOGUEIRA, 1995).

TEXTURA	LIMITES GRANULOMÉTRICOS
Pedregulho	7,6 mm a 4,8 mm
Areia Grossa	2,0 mm a 4,8 mm
Areia Média	0,42 mm a 2,0 mm
Areia Fina	0,075 mm a 0,42 mm
Silte	0,002 mm a 0,075 mm
Argila	Inferior a 0,002 mm

A fração argila foi considerada neste trabalho com diâmetro inferior a 0,002 mm, que corresponde ao tamanho mais próximo das partículas de constituição mineralógica dos argilo-minerais.

2.1.6 Etapas de trabalhos

Os trabalhos de campo foram realizados na Bacia do Rio Bacanga na etapa geral e na área do Reservatório Batatã na etapa de semi-detalle para melhor implementação do método de detalhamento progressivo (CERRI et al., 1996).

1ª Etapa – Geral

O levantamento geológico-geotécnico contou com 220 pontos observados em área de 106 km², considerando 160 pontos estudados, 29 poços tubulares, 17 poços escavados, 14 ensaios com Permeâmetro de Guelph modificado, conferindo aproximadamente 2 pontos por km², ressalta-se que as observações dos pontos ocorreram em áreas com afloramentos, drenagens, cortes de estradas e outros. A foto-interpretação sistemática, a partir de fotografias na escala de 1:8.000 do ano de 1988, foram utilizadas para determinação e individualização das áreas homólogas, conforme Soares e Fiori (1976) e Fiori (1980).

A identificação dos tipos litológicos, distribuição espacial, arranjo das camadas e profundidade associada a variação do relevo, forneceram subsídios para elaboração do mapa geológico-geotécnico na escala de 1:20.000, onde foram definidas seis unidades do terreno.

2ª etapa – Semi-detulhe

Considerando as unidades geológicas-geotécnicas definidas, selecionou-se uma área de interesse para estudos pormenorizados quanto à vulnerabilidade natural e de potencial à contaminação do solo e aquífero do Reservatório Batatã, na escala de 1:10.000, perfazendo uma área de 6,6 km² contou com 64 pontos observados distribuídos em 31 pontos estudados, 3 poços tubulares, 9 poços escavados, 14 amostras para ensaio no laboratório e 7 ensaios *in situ* com infiltrômetro de duplo anel, conferindo uma densidade de aproximadamente 10 pontos por km². A dispersão dos pontos observados não é homogênea em toda a área estudada.

Na carta de declividade foram definidas as áreas com diferentes porcentagens de inclinação do terreno, conforme procedimento empregado por De Biasi (1970), o qual consiste em determinar no mapa topográfico, áreas de um mesmo intervalo de inclinação dos terrenos.

Os limites foram escolhidos em função da própria variação de inclinação dos terrenos e da finalidade de uso da carta. Considerando que a declividade influi no tempo de contato da água com o solo, valores baixos de declividade podem indicar áreas de acúmulo, permitindo um tempo maior de contato água-solo e, conseqüentemente, um aumento significativo de volume de água infiltrada. Para variação espacial do comportamento topográfico da área foram escolhidas as classes de declividade de 0 - 2% (plano), 2 - 5% (brando), 5 - 15% (moderado) e > 15% (íngreme), com adaptações, conforme Demeck (1972 apud MOREIRA e PIRES NETO, 1998).

Foram elaboradas as cartas de profundidade do nível de água (N.A.) subterrânea e cartas de superfície potenciométrica do Aquífero Livre Barreiras, foi baseada em observações de campo, mapa topográfico, dados de três poços tubulares e de nove poços escavados medidos em período chuvoso na região, de propriedade da CAEMA e particulares, respectivamente. Os poços tubulares foram perfurados depois da construção do Reservatório Batatã, em 1964.

Foram utilizados o GPS – Garmin Plus para georeferenciar os poços e o altímetro SUNTO com precisão de 1 metro, para obtenção das cotas altimétricas.

Os dados do nível de água (N.A.) e nível estático (N.E.) foram plotados e interpolados manualmente gerando a carta de profundidade do nível de água subterrânea e a carta da superfície potenciométrica do aquífero livre Barreiras. Na primeira carta foram traçadas as

linhas de mesma profundidade do nível estático de 1m, 5 m, 10 m , 15 m e 20 m. Na segunda carta foram traçadas as linhas equipotenciais que indicam a tendência média da direção do fluxo de água subterrânea na área estudada.

Na carta de cobertura de materiais inconsolidados foram individualizadas cinco (5) unidades do terreno, com base em levantamentos de campo, onde foram considerados os perfis de alteração das topo-sequências, os aspectos geomorfológicos, litológicos, mineralógicos, cor, textura, estrutura, consistência, espessura, origem, grau de alteração, permeabilidade, nível da água e os processos do meio físico.

Paralelamente, foram realizados ensaios de laboratório em amostras deformadas e indeformadas como ensaios de granulometria conjunta, massa específica dos sólidos (ρ_s), determinação dos índices físicos do solo, como massa específica seca natural (ρ_d), índice de vazios (e) e porosidade (n). Além de ensaios com azul de metileno que permitiram estimar a capacidade de troca catiônica (CTC) da fração argila, limite de liquidez, limite de plasticidade e ensaios *in situ* de infiltração, com infiltrômetro de duplo anel para determinação da permeabilidade e do volume de infiltração.

A variação espacial das feições do terreno foram identificadas conforme Vargas (1978), Selby (1982), Souza e Zuquette (1991).

Na carta de uso e ocupação do solo foram individualizadas sete unidades, a partir da análise de fotografias aéreas na escala de 1:8.000, do ano de 2001, e de observações de campo, associadas a base topográfica das cartas planialtimétricas (DSG, 1980). As unidades identificadas foram: mata ciliar, capoeira alta a média, capoeira baixa, área degradada, área urbanizada, área em fase de urbanização e de palmáceas.

Para análise do comportamento pluviométrico da bacia, utilizou-se a série climatológica da Estação Meteorológica Cunha Machado – Tirirical. O banco de dados consiste de dados diários da série pluviométrica de 5 em 5 minutos, de 2003 a 2004, e de dados pluviométricos anuais de chuva referentes ao período de 1993 a 2003. Esses dados foram tratados no Programa Excel (MICROSOFT, 2000) e Surfer 7.0 (GOLDEN SOFTWARE, 1999). O conhecimento do comportamento da precipitação é de extrema relevância para o entendimento da dinâmica da água na bacia e a principal fonte de água para o sistema solo-água-ar, promovendo a infiltração da água e recarga dos aquíferos ou o escoamento superficial.

De posse das informações do meio físico na escala 1:20.000, identificou-se na área a problemática da vulnerabilidade natural e de potencial à contaminação do solo e aquífero do Reservatório Batatã.

Entende-se por vulnerabilidade o conjunto de características do aquífero que determina o quanto ele poderá ser afetado pela ação de determinado poluente (SILVA, 2004).

Foi utilizado o método GOD para avaliação da vulnerabilidade natural à contaminação do aquífero que se desenvolve nas seguintes fases, conforme (FOSTER et al., 2002).

1ª fase - **Grau de confinamento hidráulico da água subterrânea** - Identificação do tipo de confinamento da água subterrânea, podendo variar de livre a confinado, sendo atribuindo um índice variando de 0 a 1;

2ª fase - **Características geológicas da zona não saturada** - Especificação dos estratos de cobertura da zona saturada do aquífero em termos de:

- a) Grau de consolidação e quanto a presença ou ausência de fissuras;
- b) Tipos de litologia e natureza do ambiente de sedimentação podendo ser associada a análise da porosidade, permeabilidade, teor de umidade da zona não saturada ou a retenção de água no solo. Os valores variam de 0,4 a 1,0;

3ª fase - **Profundidade da água subterrânea (m)** - Estimação da profundidade de água subterrânea (ou aquífero confinado), sendo atribuído os valores de 0,6 a 1,0.

Finalmente estes índices são multiplicados entre si e a integração dos dados produz uma matriz de vulnerabilidade baseado nas classes de vulnerabilidade natural do aquífero que varia de extrema, alta, moderada, baixa e desprezível. Detalhes do método GOD de vulnerabilidade do aquífero são encontradas no item 3.5.

As cartas temáticas de cobertura de materiais inconsolidados e carta de profundidade do nível de água subterrâneo foram cruzadas manualmente, com auxílio da mesa de luz (*overlay*) que possibilitou a reclassificação das classes em função de uma matriz de vulnerabilidade obtida através da aplicação do método GOD. O resultado subsidiou a elaboração da carta de vulnerabilidade natural à contaminação do solo e aquífero que foram divididas em classes de baixa, moderada, alta e extrema vulnerabilidades. Posteriormente, essas informações foram associadas as informações do uso e ocupação do solo, gerando de forma conjugada a carta de vulnerabilidade natural e de potencial à contaminação do solo e aquífero do Reservatório Batatã.

A fase de detalhe do método de detalhamento progressivo (CERRI et al., 1996) não foi desenvolvida na presente pesquisa, sendo sugerida estudos em escalas 1:5.000 ou em escalas maiores para uma melhor caracterização do meio físico, considerando os objetivos das futuras pesquisas na área enfocada.

III CONCEITOS FUNDAMENTAIS

Neste capítulo, são expostos os conceitos fundamentais, extraídos da literatura disponível, que nortearam este estudo. Considera-se a bacia hidrográfica como elemento de análise, onde ocorre uma dinâmica troca de energia e matéria, sendo a água o principal dinamizador dos processos e problemas ambientais reinantes na bacia.

3.1 Bacias hidrográficas

A bacia hidrográfica ou bacia de drenagem, conforme Christofolletti (1980), é definida como a área drenada por um determinado rio ou por um sistema fluvial.

Guerra e Guerra (1997) as consideram um conjunto de terras drenadas por um rio principal e seus afluentes, verificando-se nas depressões longitudinais o lençol de escoamento superficial. A noção de bacia hidrográfica compreende a existência de cabeceiras ou nascentes, divisores de água principais, afluentes, subafluentes. Incluíram em seu conceito o dinamismo dos agentes intempéricos na modelagem do relevo.

Entende-se a bacia hidrográfica como uma unidade natural de análise da superfície terrestre passível de ocorrerem interações dos processos atuantes na esculturação do relevo (COOKE E DOORNKAMP, 1990; CHORLEY, 1984; CHRISTOFOLETTI, 1980; SELBY, 1982 e outros).

3.1.1 Morfometria de bacia hidrográfica

A rede de drenagem e as características do meio físico configuram-se como elementos fundamentais na análise da paisagem, refletindo nos índices morfométricos, as informações quantitativas para o conhecimento do comportamento da dinâmica da água em uma bacia.

Villela e Mattos (1975) consideram que, entre os índices morfométricos utilizados para o entendimento da dinâmica dos processos na bacia hidrográfica, destacam-se: a hierarquia fluvial; as formas da bacia através do coeficiente de compacidade (K_c) e o fator de forma (K_f).

O sistema de drenagem de uma bacia é constituído pelo rio principal e seus afluentes, e a disposição espacial dos padrões de drenagem indica maior ou menor velocidade de deflúvio.

Strahler (1952 Apud CHRISTOFOLETTI, 1980) definiu canais de *primeira ordem*, os canais sem tributários desde sua nascente; de *segunda ordem*, surgem da confluência de dois canais de primeira ordem. A confluência de dois canais de mesma ordem irá estabelecer uma ordem superior a jusante. A ordem do rio principal mostra a extensão da ramificação na bacia.

Para Villela e Mattos (1975), a forma da superfície é determinada por índices que a relacionam com as figuras geométricas, com o fator de forma (Kf) e coeficiente de compacidade (Kc) e indica o tempo de concentração (tempo necessário para que a água se desloque dos limites da bacia até alcançar a saída da mesma, após um evento chuvoso).

A área da bacia (A) é toda a superfície drenada pelo conjunto do sistema fluvial, projetada no plano horizontal. A área pode ser calculada, em km², a partir da determinação do perímetro da bacia.

O comprimento da bacia (L) é a maior distância medida, em linha reta, entre a foz e determinado ponto situado ao longo do perímetro, em km.

O fator de forma compreende a relação entre a área da bacia e o seu comprimento. Constitui-se de um índice indicativo da maior ou menor tendência à enchente de uma bacia. Uma bacia com fator de forma baixa é menos sujeita à enchente, mais alongada e com maior tempo de concentração. A equação é descrita da seguinte forma:

$$Kf = \frac{A}{L^2}$$

Onde : Kf = fator de forma

A = área em Km²

L = comprimento da bacia em Km

O coeficiente de compacidade relaciona a forma da bacia a uma circunferência de um círculo de área igual à da bacia. Um coeficiente mínimo igual à unidade (1) indica que a bacia tem a forma circular e para uma bacia alongada seu valor é significativamente menor que a unidade. Uma bacia será mais suscetível à enchente quando seu índice estiver próximo a 1 (VILLELA e MATTOS, 1975). A equação é descrita da seguinte forma:

$$Kc = 0,28 \frac{P}{\sqrt{A}}$$

Onde: Kc = coeficiente de compacidade

P = Perímetro em Km

A = Área em Km²

A declividade da bacia controla a velocidade do escoamento superficial, afetando o tempo de concentração da rede de drenagem da bacia. A magnitude dos picos de enchente depende da velocidade do escoamento superficial na bacia, podendo dinamizar processos de infiltração ou erosão.

O Modelo Numérico do Terreno (MNT) expressa as variações de altitude, sendo uma representação gráfica do relevo em relação ao nível do mar, utilizado para identificação das unidades de paisagens.

A análise dos parâmetros morfométricos da bacia fornece uma indicação das interações dos processos morfológicos, hidrológicos e da ação antrópica, auxiliando no planejamento ambiental de uma bacia para prevenir futuras ações que possam determinar perdas de caráter hidrológicos irreparáveis para o ambiente.

Para entender o funcionamento de uma bacia de drenagem, há necessidade dos conhecimentos dos processos e de suas inter-relações com o meio físico e biótico, através de uma visão integrada.

3.1.2 Visão integrada da bacia hidrográfica

A bacia hidrográfica é considerada como unidade natural de análise para os estudos de interação dinâmica com os diversos elementos da paisagem e os processos que atuam na sua esculturação. A análise sistêmica de uma bacia hidrográfica possibilita racionalizar melhor os estudos diante da necessidade da preservação, conservação e recuperação dos recursos hídricos.

De acordo com a Lei Federal nº 9.433 a adoção da bacia hidrográfica como unidade de planejamento permite se fazer o confronto entre a disponibilidade da água e as demandas, essenciais para o estabelecimento do balanço hídrico (SETTI et al., 2001).

O estudo de vulnerabilidade das bacias à contaminação do solo e das águas envolve análise dos principais fatores como: litologia, tipos de solo, topografia, profundidade do lençol freático, uso e ocupação do solo. Dependendo do método utilizado se pode inserir uma ou mais variáveis na análise.

Vários estudos foram realizados nas bacias hidrográficas enfocando uma análise integrada das características do meio físico e uso e ocupação como os de Ferreira (2001), Nishimura e Zuquette (1994), Junior Carpi (2001), Narciso e Gomes (2005), Guiguer e Kohnke (2002).

3.1.2.1 Legislação

A legislação das águas no Brasil compete à União, além de definir critérios de outorgas de direito de uso das águas.

Constituem competência comum da União, Estados e Municípios: proteger o meio ambiente e combater a poluição em qualquer de suas formas, promover a melhoria das condições e fiscalizar as concessões de direito de exploração dos recursos hídricos em seus territórios, legislar concorrentemente sobre defesa do solo e dos recursos naturais, proteção do meio ambiente e controle da poluição, responsabilidade por danos ao meio ambiente, proteção e defesa da saúde (BRASIL, 1988).

A Política Nacional do Meio Ambiente, estabelecida pela Lei nº 6.938, (BRASIL,1981), tem como objetivo a preservação, melhoria e recuperação da qualidade ambiental propícia à vida, visando a assegurar no país condições para o desenvolvimento sócio-econômico, os interesses da segurança nacional e a proteção da dignidade da vida humana. Dentre os princípios desta Lei destacam-se:

- *O controle e zoneamento das atividades potenciais ou efetivamente poluidoras;*
- *O acompanhamento do estado da qualidade ambiental;*
- *Proteção de áreas ameaçadas de degradação;*
- *A educação ambiental em todos os níveis de ensino, inclusive a educação da comunidade.*

O Brasil dispõe do Código das Águas, regulamentado pelo Decreto Federal nº 24.643, (BRASIL,1934), que estabelece, em seus artigos, o uso gratuito de qualquer corrente ou nascente de água para as primeiras necessidades da vida e permite a todos usar de quaisquer águas públicas, conformando-se com os regulamentos administrativos. Dentre outras considerações sobre as águas, estabelece que “*a ninguém é lícito conspurcar ou contaminar as águas que não consome, com prejuízos de terceiros*”. O princípio do “usuário-pagador”, introduzido na Europa, está previsto nos Arts. 111 e 112 do Código das Águas, que penaliza o poluidor pelas perdas e danos que causarem, responsabilizando-o criminalmente e por multa que lhe forem impostas pelos regulamentos administrativos.

O Código das Águas, para a conjuntura atual do país, está obsoleto em alguns aspectos, “tal ordenamento não foi capaz de incorporar os meios para combater ao

desconforto hídrico, a contaminação das águas e conflito de uso, também não sendo suficiente para promover os meios de uma gestão descentralizada e participativa, exigências dos dias de hoje” (ANEEL, 1999).

O surgimento da Política Nacional de Recursos Hídricos, instituída pela Lei 9.433 (BRASIL, 1997) representou um novo marco institucional do país, incorporando princípios, normas e padrões de gestão de água aceitos em vários países.

As mudanças ocorridas com o desenvolvimento econômico e industrial imprimem ao homem mudanças na maneira de tratar os recursos hídricos, um bem indispensável para a manutenção da vida no planeta. A água é reconhecida como um recurso vulnerável, finito e já escasso em quantidade e qualidade, portanto, trata-se de um recurso natural dotado de valor econômico que precisa de instrumentos legais para garantir a oferta e a demanda de forma sustentável.

A Lei 9.433 (BRASIL, 1997) destaca, dentre outros, os seguintes fundamentos:

- A água é um bem de domínio público;
- A água é um recurso natural limitado, dotado de valor econômico;
- A bacia hidrográfica é a unidade territorial para implantação da Política Nacional de Recursos Hídricos e atuação do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos;
- A gestão dos recursos hídricos deve ser descentralizada e contar com a participação do poder público dos usuários e das comunidades.

A Lei nº 9.984 (BRASIL, 2000), criou a Agência Nacional de Águas – ANA, entidade federal de implementação da Política Nacional de Recursos Hídricos e da Coordenação do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos. Trata-se de uma autarquia sob regime especial, com autonomia administrativa e financeira, vinculada ao Ministério de Meio Ambiente. Cabe a essa agência a implantação e aplicação da Lei nº 9.433, de 1997.

3.2 Mapeamento Geotécnico

O mapeamento geotécnico tem fundamental importância no planejamento ambiental, por meio da análise, classificação e avaliação dos componentes do meio físico. O nível de conhecimento depende dos objetivos da análise, podendo ser de caráter regional ou local, e as informações podem ser qualitativas ou quantitativas, dependendo das escalas utilizadas no estudo.

A representação da cartografia geotécnica permite ao usuário visualizar as características e os processos do meio físico, considerando suas limitações e potencialidades para possíveis tomadas de decisão em função do dinâmico processo de uso e ocupação das áreas territoriais.

Os documentos gráficos resultantes das pesquisas no campo da geotecnia são denominados *mapas geotécnicos*, cujas definições de vários autores são listadas a seguir:

Mapa geotécnico é um tipo de mapa geológico que classifica e representa os componentes do ambiente geológico, os quais são de grande significado para todas as atividades de engenharia, planejamento, construção, exploração e preservação do ambiente (IAEG, 1976).

Mapa geotécnico tem por finalidade básica levantar, avaliar e analisar os atributos que compõem o meio físico, sejam geológicos, hidrológicos, hidrogeológicos e outros, os quais deverão ser utilizados para fins de engenharia, planejamento, agronomia, saneamento e outros. As informações devem ser manipuladas através de processos de seleção, generalização, adição e transformação, para que possam ser relacionadas e interpretadas e no final representadas em mapas, cartas e anexos descritivos (ZUQUETTE, 1987).

Mapa geotécnico requer para sua realização operações básicas de adição, seleção, generalização e transformações das informações especiais relativas a litologia e estruturas dos solos e rochas, hidrogeologia, geomorfologia e processos geológicos (VARNES, 1995).

Prandini et al. (1995) consideram ainda, que o mapa geotécnico expõe as limitações e as potencialidades dos terrenos e estabelece as diretrizes de ocupação para as diversas formas de uso.

O homem promove mudanças profundas na dinâmica do meio físico, podendo causar severos problemas ao ambiente, principalmente quando as condições geológicas geotécnicas

não forem observadas como parâmetro decisivo na tomada de decisão para quaisquer empreendimentos.

Os termos cartas e mapas são muito difundidos na cartografia geotécnica (ZUQUETTE, 1987, 1993 - Tabela 2).

3.2.1 Objetivos e aplicações dos mapas geotécnicos

Os mapas geotécnicos enfocam a busca pelo mínimo de impacto resultante de obras civis e otimização da conservação dos recursos naturais, sendo utilizados para resolução ou mitigação de problemas em decorrências dos impactos ambientais oriundos do uso e ocupação do solo sem prévio planejamento (Tabela 3).

Tabela 2 - Termos utilizados na cartografia geotécnica (ZUQUETTE, 1987, 1993).

TERMOS	CONCEITOS
Mapa Geotécnico	Representação dos atributos do meio físico levantados sem realização de análise interpretativa e sempre para escalas inferiores a 1:10.000, exemplo: mapa topográfico e geológico.
Carta geotécnica	Representação geográfica dos resultados da interpretação dos atributos que estão num mapa, exemplo: carta de escavabilidade, carta clinométrica, carta de declividade.
Planta geotécnica	Representação gráfica realizada em escala grande, maior que 1:5.000, normalmente voltadas para locais onde serão executadas obras específicas.

3.2.2 Metodologias utilizadas no Brasil

O mapeamento geotécnico, conforme as metodologias de Nakazawa et al. (1991) e Prandini et al. (1995), identifica as principais características dos materiais (geologia e

geomorfologia), determina zonas homogêneas e os processos envolvidos com a finalidade de tecer considerações sobre as possíveis medidas preventivas, reparadoras, minimizadoras dos problemas ambientais identificados. Essas metodologias são utilizadas pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT) e, raramente, apresentam quantificação dos parâmetros geológico-geotécnicos.

Tabela 3 - Principais objetivos, aplicações e usuários das cartas geotécnicas (modificado de CERRI, 1990).

OBJETIVOS	APLICAÇÕES	USUÁRIOS
<p>Melhor utilização do espaço físico disponível;</p> <p>Conservação ambiental e proteção dos recursos naturais;</p> <p>Estabelecimento de critérios técnicos para a expansão da ocupação e a recuperação de áreas degradadas por ocupação de áreas desordenadas;</p> <p>Segurança das edificações e da população, através da previsão e prevenção de riscos geológicos (naturais e induzidos);</p> <p>Otimização da aplicação de recursos públicos e privados;</p> <p>Orientação (e não substituição) de estudos e ensaios específicos para projetos de engenharia.</p>	<p>Subsídios à elaboração de projetos voltados ao planejamento e gerenciamento do uso e ocupação do solo, em todos os níveis (Plano Diretor, zoneamento, parcelamento e desmembramento) inclusive, na própria elaboração de dispositivos legais inerentes ao uso do solo;</p> <p>Subsídios aos estudos de impacto ambiental;</p> <p>Na restrição à ocupação de áreas sob riscos geológicos;</p> <p>Na definição de locais mais adequados, dos cuidados e estudos específicos para implantação de obras de engenharia;</p> <p>Na melhor estimativa dos custos de implantação dos empreendimentos;</p> <p>No estabelecimento de critérios técnicos para eficientes sistemas de manutenção das obras de engenharia.</p>	<p>Planejadores</p> <p>Urbanistas</p> <p>Projetistas</p> <p>Construtores</p> <p>Administradores Públicos e outros.</p>

Zuquette (1987, 1993) elaborou uma proposta metodológica para realização do mapeamento geológico-geotécnico, utilizada pela Escola de Engenharia de São Carlos (EESC/USP), para definir, identificar e isolar os atributos que devem ser utilizados para caracterização das unidades homogêneas, tratamento dos dados através da hierarquia das informações obtidas e elaboração dos documentos cartográficos, gerando as cartas fundamentais e interpretativas.

A elaboração de mapas geotécnicos de áreas urbanas com o emprego do método do detalhamento progressivo desenvolve-se em três etapas sucessivas (Tabela 4), com nível de detalhamento crescente, do geral para o particular, conforme Cerri et al. (1996).

O método do detalhamento progressivo foi utilizado por Zaine (2000) para o município de Rio Claro, envolvendo o sítio urbano e de expansão, como subsídio à gestão e ao planejamento municipal. Para a 1ª etapa (geral), na escala de 1:25.000, em uma área de 160 km², foi elaborado um mapa geológico-geotécnico, no qual foram definidas 6 (seis) unidades geológica-geotécnicas, com a indicação na legenda do mapa de informações como a de profundidade do nível de água subterrâneo e dos principais processos e problemas ambientais. Na fase de semi-detalle foi gerada uma matriz de correlação, utilizando a integração dos mapas, na escala de 1:10.000, de unidades de cobertura de materiais inconsolidados, carta de declividade e profundidade do nível de água subterrâneo. E na etapa final do método, fase de detalhe, direcionou para a pesquisa, em uma escala maior (1:5.000), estudos de caracterização geotécnica (com ensaios de laboratório) para a instalação de posto de combustível.

Lollo e Zuquette (1996) desenvolveram a técnica de avaliação do terreno (sistema de terreno, unidade do terreno e elemento do terreno), baseada no conceito de *landform*, no uso de mapas anteriores, na caracterização das unidades geotécnicas e elaboração de mapas e outros documentos (Figura 3).

Na área de hidrologia, os mapeamentos geológico-geotécnicos são voltados para análise da vulnerabilidade, potencialidades e aos processos do meio físico em geral (Tabela 5).

No Brasil, as pesquisas geológicas-geotécnicas restringem-se às universidades, ao Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT) e à Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM). A importância dessas pesquisas é que as informações cartográficas podem reverter em benefícios, auxiliando o planejador na tomada de decisão para conservação e proteção do solo.

Tabela 4 - Síntese das etapas do método do detalhamento progressivo (CERRI et al., 1996).

ETAPAS	MAPAS GEO-TÉCNICO - ESCALAS	CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA	OBJETIVOS
1ª ETAPA GERAL	1 : 50.000 ou 1: 25.000	Análise Regional	<ul style="list-style-type: none"> • Compreender as áreas urbanas e com perspectivas de urbanização a médio prazo em termos de planejamento urbano; • Caracterização do meio físico geológico em relação à ocupação urbana; • Quantificação restrita.
2ª ETAPA SEMI- DETALHE	1: 25.000 (Quando a 1ª etapa é realizada na escala 1:50.000); 1: 10.000 (Primeira etapa na escala 1: 25.000).	Detalhamento da caracterização do meio físico geológico; Identificação de eventuais problemas geológico-geotécnicos instalados;	<ul style="list-style-type: none"> • Fornecer subsídio direto para o adequado planejamento e gestão do uso do solo urbano; • Direcionar os trabalhos com base nas necessidades e objetivos da pesquisa; • Quantificação parcial dos atributos geológico-geotécnico.
3ª ETAPA DETALHE	Escala de detalhe 1: 5.000 ou maior; Estudos geológicos-geotécnicos específicos.	Entendimento dos processos do meio físico instalado e a busca de soluções ou mitigação para eventuais problemas.	<ul style="list-style-type: none"> • Seleção da área em função dos estudos específicos; • Subsidiar a elaboração de projetos de obras de engenharia para minimizar problemas instalados ou à implantação de novos empreendimentos; • Quantificação dos atributos – indispensável

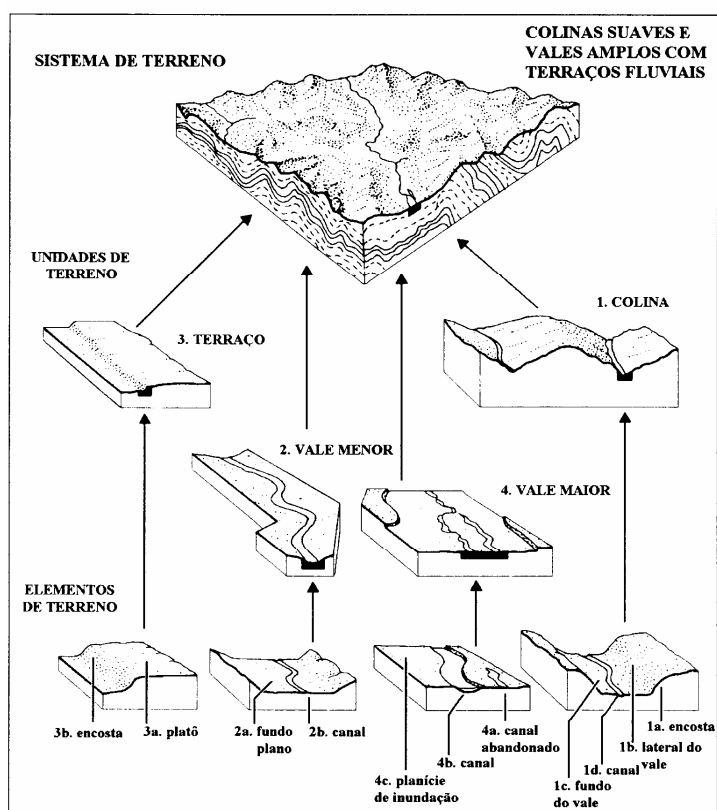


Figura 3 - Técnica de avaliação do terreno (modificado de COOKE e DOORKAMP, 1990 apud LOLLO e ZUQUETTE, 1996).

Tabela 5 – Mapeamentos geotécnicos enfocando as cartas de vulnerabilidades e potencialidades.

AUTOR	ANO	REGIÃO	ESC.	CRITÉRIOS	OBJETIVOS
Zuquette et al.	1993	Ribeirão Preto –SP	1:50.000	Geotécnicos-pedológicos	Contaminação de aquífero
Zuquette et al.	1991	Ribeirão Preto –SP	1:50.000	Geotécnico-hidrológicos	Potencialidades do escoamento
Pejon e Zuquette	1993	Piracicaba,SP	1:100.000	Geotécnico-hidrológicos	Potencialidades do escoamento
Nishimura e Zuquette	1994	São Carlos, SP	1:100.000	Geotécnico-hidrológicos	Contaminação de aquífero Botucatu
Bachion e Rodrigues	1998	Campinas, SP	1:25.000	Geotécnico-hidrológicos	Potencial de escoamento superficial
Narciso e Gomes	2005	Serra das Areias - GO	1:100.000	Geológico-hidrológico	Vulnerabilidade do aquífero
Lopes e Pejon	2005	Bacia do Rio Passa Cinco e Rio Cabeça	1:50.000	Geológico-hidrológico	Potencial a infiltração e erosão

3.2.3 Metodologias geotécnicas internacionais

Diversos países desenvolveram metodologias que serviram de base para elaboração da cartografia geotécnica, sendo que o produto cartográfico, dependendo da escala e das informações do meio físico, recebe as seguintes denominações: *Engineering Geological Map* (países de língua inglesa), *Carter Geotechnique* (na França), *Carta Geológica* (na Itália), *Environmental Geological Map e Soil and Subsoil Map* (EUA, Canadá, África do Sul). Maiores informações são obtidas em Zuquette (1987, 1993) e Zuquette e Gandolfi (2004).

A cartografia geotécnica em Portugal segue, com adaptações, a metodologia proposta por IAEG/UNESCO e a de Matula (1979), destacando-se a atividade do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) e as universidades (RODRIGUES et al., 2004).

Cooke e Doornkamp (1990, tradução nossa) propuseram uma sistemática baseada no mapeamento de sistemas de terreno e mapas geomorfológicos. Trata-se de analisar grandes áreas em curto período de tempo. Na prática, o critério mais simples é extrair os limites das unidades baseado na topografia, em adição, a interpretação do solo, geologia, e os processos deposicionais e erosivos vêm completar a análise do *landform*. A geomorfologia é o elemento chave para o mapeamento do terreno sendo o mais integrado dos recursos, especialmente, no estágio rápido de reconhecimento.

O sistema PUCE desenvolvido por Grant (1965 apud ZUQUETTE e GANDOLFI, 2004) é uma metodologia baseada em classes de terreno hierarquizadas a partir de características gerais (geológico-geomorfológica), uso do solo e geotécnicas. Os terrenos são divididos e classificados em quatro classes hierárquicas (Tabela 6).

O método do detalhamento progressivo, para definição das unidades geológico-geotécnicas (1ª etapa), baseia-se na análise do sistema do terreno dando ênfase às formas geomorfológicas, geologia e dinâmica dos processos, similar ao considerado pelo método PUCE.

Tabela 6 - Formas de análise e quantificação para as classes hierárquicas na metodologia PUCE (ZUQUETTE e GANDOLFI, 2004).

CLASSES DO TERRENO	FATORES DO TERRENO PARA DESCRIÇÃO	FATORES DO TERRENO PARA QUANTIFICAÇÃO	MÉTODO PARA QUANTIFICAÇÃO
Província	Geologia (Grupo, Formação)		
Padrão do Terreno	Paisagem, características básicas do solo, vegetação, rochas e padrão de drenagem	Amplitude de relevo Frequência de canais de drenagem	Fotos aéreas ou medidas <i>in situ</i>
Unidades do terreno	Formas do relevo Principais características dos solos, rochas e formações vegetais	Dimensões das unidades do terreno (amplitude do relevo, comprimento e largura)	Fotos aéreas ou medidas <i>in situ</i>
Componentes do terrenos	Tipo de talude Litologia Solo Associação de vegetação	Dimensões dos componentes do terreno (amplitude do relevo, comprimento, largura e talude); Dimensões relativas à vegetação (altura, diâmetro, espaçamento); Propriedades dos materiais geológicos; Quantidade dos materiais terrosos	Medidas <i>in situ</i> Medidas <i>in situ</i> Medidas <i>in situ</i> e laboratório; Medidas ou estimativas

3.3 Dinâmica das águas

A água penetra no solo definindo as zonas não saturada e saturada, dependendo do preenchimento dos poros. As características das zonas dependem da quantidade relativa de cada componente do solo, refletido nas propriedades geotécnicas dos materiais e capaz de desencadear processos e problemas ambientais.

3.3.1 Distribuição e movimento da água no subsolo

A água, quando penetra no solo, sofre a ação da força gravitacional e depende das características do solo, sedimentos ou rochas, sendo o seu movimento controlado pelas forças de atração entre as moléculas e a tensão superficial. O limite inferior de percolação das águas é dado quando as rochas não admitem mais espaços abertos (poros) devido à pressão da pilha da rocha sobrejacente, formando o nível de água subterrânea (N.A.) ou superfície freática (Figura 4).

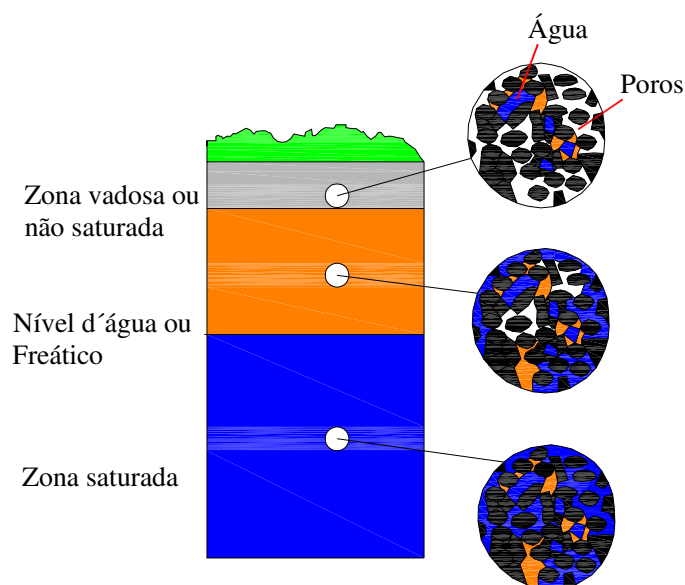


Figura 4 - Distribuição de água no subsolo (adaptado de KARMANN, 2001).

3.3.2 Zona não Saturada ou Vadosa

O processo de infiltração inicia-se quando a água da chuva ou de irrigação atinge a superfície terrestre. A infiltrabilidade do solo é a máxima razão na qual a chuva ou água de irrigação podem ser absorvidas pelo subsolo sob determinada condição. O conhecimento das taxas de infiltrabilidade possibilita estimar a quantidade de água disponível para infiltração e escoamento em uma determinada área.

Um evento chuvoso apresenta altura pluviométrica que exprime a quantidade de chuva pela altura de água caída (h) e acumulada sobre uma superfície plana e impermeável. A altura pluviométrica ou total é expressa em mm que significa 1litro/m², podendo ser mensurada em totais anual, mensal, diário e horário.

A distribuição da água durante o processo de infiltração, abaixo da condição de *podung* (acúmulo de água na superfície), é ilustrada para solos homogêneos em cinco zonas (Figura 5, BRANDÃO, PRUSKI e SILVA, 2002).

- Zona Saturada: os espaços porosos são todos preenchidos por água ou saturados. Esta zona estende-se a uma profundidade de poucos milímetros;
- Zona de Transição: caracteriza-se pela rápida diminuição do conteúdo de água com a profundidade e estende-se a poucos centímetros;
- Zona de Transmissão: onde ocorrem pequenas mudanças no conteúdo de água com a profundidade. Em geral, é um prolongamento da zona não saturada, com conteúdo de água mais uniforme. O gradiente hidráulico é governado, principalmente, pela força gravitacional.
- Zona de Umedecimento: na qual o conteúdo de água decresce nitidamente, sendo possível obter a umidade inicial do solo.
- Frente de Umedecimento: Limite entre o solo seco e o úmido. O gradiente hidráulico principal do solo é função do potencial matricial.

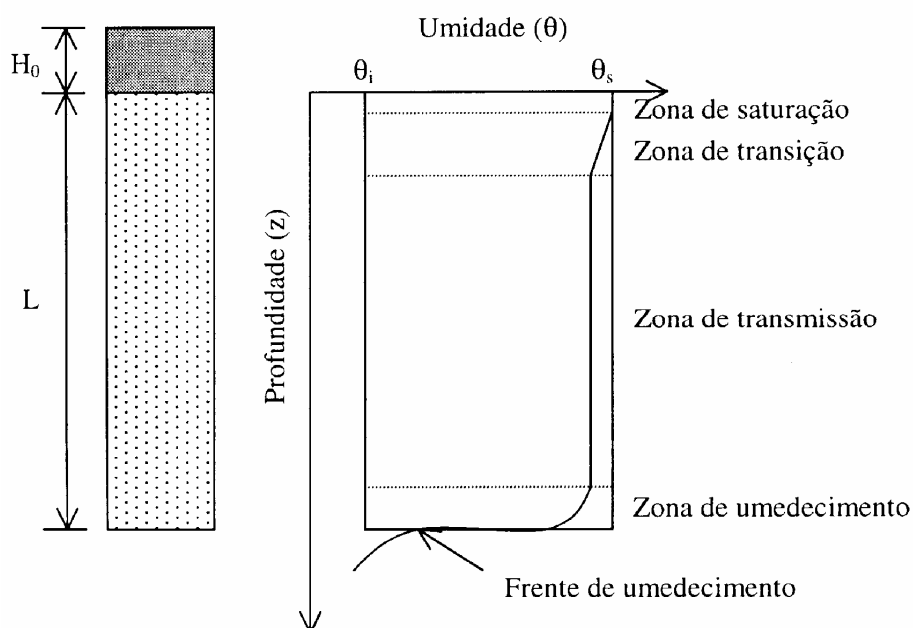


Figura 5 - Zonas do processo de infiltração (BRANDÃO, PRUSKI e SILVA, 2002).

A infiltração de água no solo é controlada pela intensidade e duração da aplicação de água, propriedades físicas de solo, declividade, vegetação e uso do solo. Geralmente, quando a água é acumulada (*ponded*) em cima da superfície de terra, a taxa de aplicação de água excede o valor de infiltrabilidade no solo e o excesso de água transforma-se em escoamento superficial. Por outro lado, se a água for lentamente aplicada, a taxa de aplicação de água pode ser menor que o da infiltrabilidade, ocorrendo infiltração no solo.

A taxa de infiltração no início do processo, em geral, é alta, tendendo a um decréscimo com o tempo até atingir uma taxa constante, chegando-se, assim, ao valor da condutividade hidráulica saturada do solo (Figura 6).

O conteúdo de umidade inicial e a condutividade hidráulica do solo são os principais fatores que afetam diretamente o processo de infiltração de água no solo. Em geral, quanto mais alta a condutividade hidráulica saturada do solo, maior a infiltrabilidade.

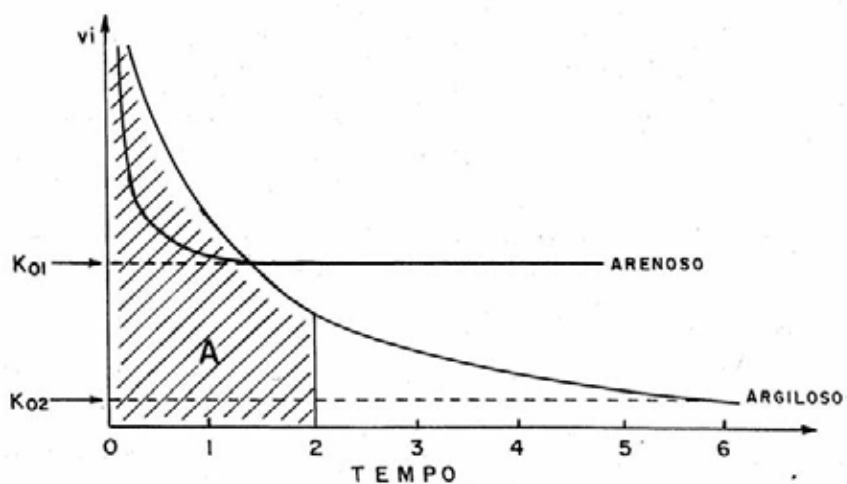


Figura 6 - Evolução da taxa de infiltração com o tempo (REICHARDT, 1990).

O movimento da água na zona vadosa ocorre, geralmente, em três estágios designados: infiltração, redistribuição e drenagem ou percolação profunda (Figura 7, EPA, 1998).

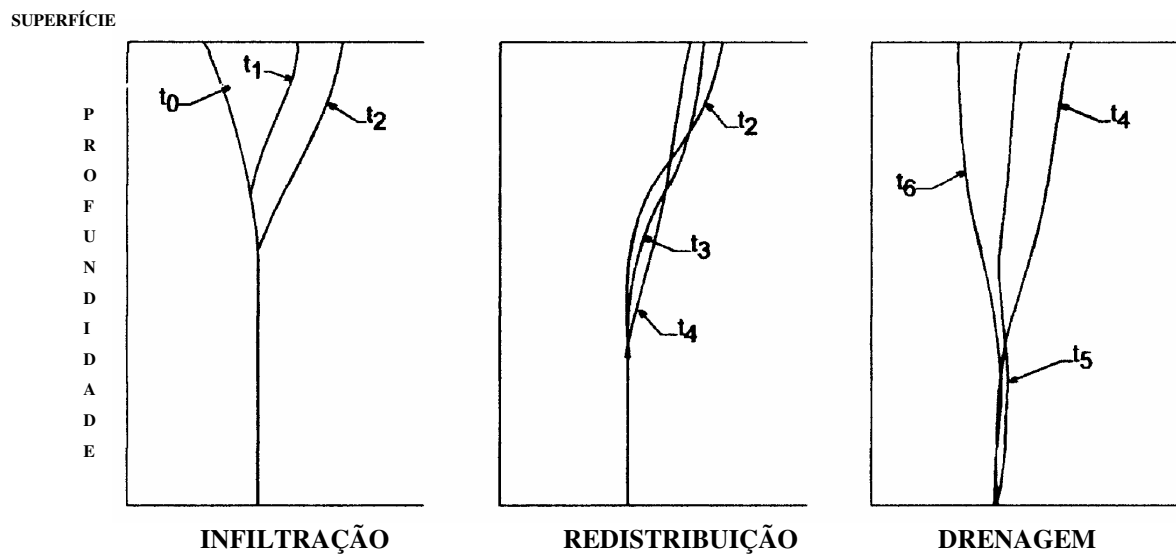


Figura 7 – Conceituação do movimento de água no perfil de solo (EPA, 1998).

Durante a infiltração, forças capilares ou matriciais são dominantes no solo; na redistribuição dessa água, as forças capilares e gravitacionais são importantes e simultaneamente, ocorre a drenagem, em cuja fase se dá o molhamento.

No estágio final, a percolação profunda ou recarga ocorre quando a frente de molhamento atinge o nível de água (N.A.).

O perfil do solo é formado por camadas ou horizontes distintos com características hidráulicas e físicas específicas. As diferentes camadas do solo facilitam ou retardam o movimento de água durante a infiltração. As camadas de argila impedem o fluxo devido a sua baixa condutividade hidráulica, enquanto as camadas de areia têm uma tendência de retardar o movimento de água na frente de molhamento, devido ao tamanho dos poros e ao elevado gradiente hidráulico.

O selamento da superfície, causado pelo impacto das gotas de chuva (*splash*) em solos desnudos ou intensamente cultivados ou pisoteados, também se comporta como uma barreira hidráulica na infiltração, devido à mais baixa condutividade hidráulica próximo da superfície.

A declividade do solo pode, indiretamente, afetar a taxa de infiltração. Declives íngremes resultarão em aumento do *runoff*, diminuindo a quantidade de tempo em que a água estará disponível para infiltração. Em contraste, declives suaves diminuem o *runoff* e aumentam o tempo para o processo de infiltração.

A cobertura vegetal tende a aumentar a infiltração, retardando o fluxo de escoamento superficial e permitindo um tempo maior para infiltração da água. As raízes das plantas também podem favorecer a infiltração aumentando a condutividade hidráulica da superfície do solo. Devido a esses efeitos, a infiltração pode variar amplamente sob diferentes tipos de vegetação. A manutenção da cobertura vegetal aumenta a macroporosidade, pois o sistema radicular das plantas cria caminhos preferenciais que favorecem o movimento da água e protegem os agregados do impacto direto das gotas de chuva.

O uso do solo pode acelerar ou retardar as taxas de infiltração. As áreas urbanizadas apresentam maiores taxas de impermeabilização da superfície do solo, o que limita sua capacidade de infiltração. Entretanto, em áreas de cultivo, o solo, geralmente, tende a aumentar a capacidade de infiltração em razão da quebra da estrutura da camada superficial.

3.3.3 Zona Saturada

O movimento da água subterrânea é guiado também pela diferença de pressão entre dois pontos, exercida pela coluna de água sobrejacente aos pontos, e pelas rochas adjacentes, denominada de potencial hidráulico, promovendo o movimento da água subterrânea do ponto de alto (tabuleiros) para baixo potencial (fundo de vales). A união de pontos com o mesmo potencial hidráulico em subsuperfície define as linhas eqüipotenciais do aquífero. A linha de fluxo segue o caminho mais curto entre dois potenciais diferentes, num traçado perpendicular às linhas equipotenciais (KARMANN, 2001, FETTER, 2001, CEDERGREN, 1989).

As unidades rochosas ou sedimentos, porosos e permeáveis, que armazenam e transmitem volumes significativos de água subterrânea passível de ser explorada pela sociedade, são chamadas de aquíferos, conforme Manoel Filho (1997), Azevedo e Albuquerque Filho (1998), Karmann (2001).

Os aquíferos livres são constituídos por materiais ou rochas que armazenam água e permitem sua circulação, o nível de água subterrânea está submetido a pressão atmosférica sendo denominado aquífero freático ou livre. Na área de estudo, os sedimentos da Formação Barreiras são caracterizados como aquífero livre, Azevedo e Albuquerque Filho (1998).

Os aquíferos aquífero são constituídos por materiais ou rochas porosas que embora armazenem quantidades significativas de água no seu interior permitem a circulação muito lenta, neste caso, podem ser enquadradas as rochas da Formação Itapecuru.

3.3.4 Medidas de infiltração

O movimento da água no meio poroso torna-se muito complexo devido à alta variabilidade das propriedades física dos materiais inconsolidados e rochas.

Em 1856, o engenheiro hidráulico Henry Darcy realizou uma experiência sobre infiltração vertical, utilizando como solução a água em filtros de areia homogêneos sob condições de saturação. Concluiu que o fluxo laminar de água que atravessa um meio poroso homogêneo e isotrópico tem velocidade constante, sendo equacionada em:

$$Q = KA \frac{h_1 - h_2}{L}$$

Onde:

Q = vazão;

K = condutividade hidráulica;

A = área

$h_1 - h_2$ = diferença da carga piezométrica;

L = comprimento do filtro de areia.

A condutividade hidráulica (K) é o coeficiente que expressa a facilidade com que um fluido é transportado através de um meio poroso e depende das propriedades do meio e do fluido (LIBARDI, 1980; CEDERGREN, 1989). É um dos mais importantes parâmetros hidráulicos e depende da natureza do meio, densidade e viscosidade do fluido, sob determinadas condições de temperatura e pressão. É função direta da umidade volumétrica (θ), em condições de solo saturado (umidade de saturação = porosidade do solo), o valor de K é máximo. À medida que a umidade diminui, a condutividade hidráulica diminui de forma exponencial.

A condutividade hidráulica varia com: a textura do solo (em solo arenoso varia de 10^{-2} a 10^{-3} e nos argilosos de 10^{-4} a 10^{-7} cm/s); a porosidade e, principalmente, o tamanho dos poros. Solos arenosos apresentam maiores valores de K do que os de textura fina em condições de saturação.

Reynold e Elrick (1983) propuseram a utilização da condutividade hidráulica saturada (Kfs) para investigação na zona vadosa, devido a valores positivos de ψ (potencial total do solo). Usualmente, o ar não persiste por muito tempo aprisionado nos poros do solo.

A condutividade hidráulica apresenta uma distribuição de frequência log-normal devido a processos químicos, físicos e biológicos que ocorrem continuamente como, por exemplo, a alteração de íons trocáveis e a migração de partículas de argila durante o fluxo.

3.3.5 Permeâmetro de Guelph

O permeâmetro de Guelph foi desenvolvido por Reynolds e Elrick (1983) e aperfeiçoado por Reynolds e Elrick (1985), empregando o princípio de Mariotte. Permite determinar a condutividade hidráulica saturada (Figura 8).

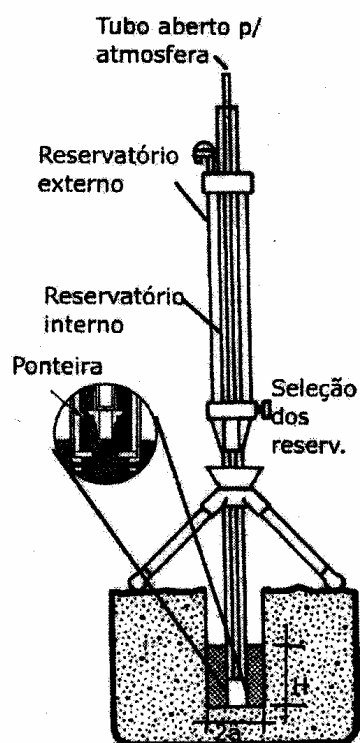


Figura 8 – Esquema do Permeâmetro de Guelph (MACHADO, 1994).

As vantagens e desvantagens do método, conforme (SOILMOISTURE, 1987):

- O método produz, simultaneamente, in situ medidas de Kfs.
- O aparelho é barato e de fácil operacionalização.
- No campo, dois ou três permeâmetros podem ser operados por uma pessoa.
- O método pode ser usado para se obter o perfil vertical.
- O permeâmetro pode operar em poços de até 1 m ou a grandes profundidades.
- O método requer uma pequena quantidade de água para a operação.
- O tempo de operacionalização é menor comparado com outros métodos.
- O método é eficaz no monitoramento da zona vadosa em projetos de irrigação, sistemas de drenagem, canais, reservatório, aterro sanitário, estação de tratamento, áreas de tailings, armazenamento de produtos perigosos, instalações industriais e na agricultura.

A principal desvantagem é considerar uma área pequena, não refletindo a heterogeneidade do solo. No campo, obtêm-se dados de condutividade hidráulica negativa em presença de descontinuidade hidrológica, tipicamente causada pela presença de raízes ou roedores.

3.3.6 Infiltrômetro

O infiltrômetro de anéis duplo consiste de dois anéis concêntricos, o menor com 30 cm e o maior com 60 cm, instalados no solo com ajuda de marreta. Para isso, é necessário que as bordas inferiores dos anéis sejam finas, cortadas em forma de bisel para facilitar a penetração (Figura 9).

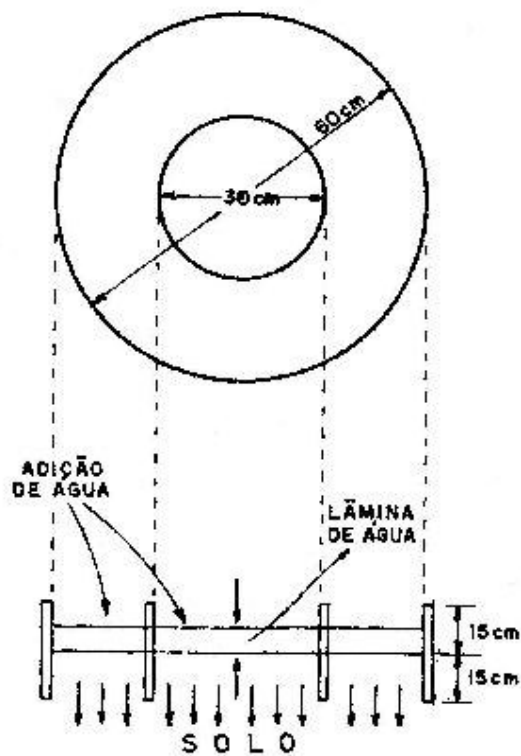


Figura 9 - Representação esquemática de um infiltrômetro de anel (REICHARDT, 1990).

A infiltração ocorre devido à diferença de potencial entre a água na superfície do solo e o solo seco. Inicialmente, as taxas de infiltração são mais elevadas, diminuindo, gradativamente, até atingir valor constante, correspondente à condutividade hidráulica do solo saturado, quando este atinge a saturação.

Pode-se determinar a velocidade de infiltração (V_i) para cada instante, considerando os tempos (t) de leitura:

$$V_i = \frac{\Delta h}{\Delta t} \times 60 = \frac{h_n - h_{n-1}}{t_n - t_{n-1}} \times 60$$

Os valores de h são medidos por meio de uma régua fixa ao cilindro, que indica a altura de água sobre o solo.

O gráfico resultante da infiltração acumulada (Δh) versus tempo (Δt) indica as medidas de V_i , grande no início da infiltração e que vai diminuindo com o tempo. O solo se satura e a velocidade de infiltração se estabiliza, assumindo um valor constante, denominado condutividade hidráulica do solo saturado (K_o) (Tabela 7).

Tabela 7 – Critério de classificação de infiltração básica, Reichardt (1990).

K_o	VALOR (cm/h)
Muito alto	> 3
Alto	1.5 - 3
Médio	0.5 - 1.5
Baixo	0.5 - 0.1
Muito baixo	< 0.1

O método utiliza uma área no cilindro interno (30 cm) para saturação do solo, uma área relativamente representativa, e o cilindro externo minimiza os efeitos da histerese no solo. Uma desvantagem é a necessidade de grande quantidade de água para realização do ensaio.

3.4 Processos exógenos do meio físico

Os principais processos exógenos do meio físico natural que podem ser influenciados pela ação antrópica são: erosão, assoreamento, enchentes, inundação, movimento de massa, subsidência, colapso e contaminação da água subterrânea.

3.4.1 Erosão

Entende-se como erosão o processo de desagregação e remoção de partículas do solo ou de fragmentos e partículas de rochas, pela ação combinada dos agentes intempéricos; nas regiões tropicais, a chuva é um dos principais agentes deflagradores do processo, provocando a modelagem do relevo (IPT, 1986; GUERRA e GUERRA, 1997; SUGUIO, 1998). A erosão é classificada em duas formas: a geológica ou natural e a acelerada ou antrópica.

A erosão geológica se desenvolve em condições de equilíbrio com a formação do solo, onde o trabalho mecânico de destruição é exercido pelas águas correntes carregando sedimentos e depositando-os em áreas baixas.

A erosão acelerada envolve a intervenção do homem no meio físico, alterando os processos geológicos e ocasionando o desequilíbrio no sistema.

Os processos erosivos permitem destacar dois importantes eventos iniciais: o impacto das gotas de chuva na superfície do solo (*splash*) e o escoamento superficial das águas (*run off*), permitindo o transporte das partículas.

Dependendo da forma do escoamento superficial ao longo da vertente, pode-se desenvolver dois tipos de erosão: *erosão laminar ou lençol* (Figura 10), causada por escoamento difuso das águas das chuvas, resultando na remoção progressiva dos horizontes superficiais do solo; *erosão linear*, provoca a concentração das linhas de fluxo das águas de escoamento superficial, resultando em incisões na superfície do terreno, na forma de sulcos, ravinas e voçorocas (OLIVEIRA, 1994).

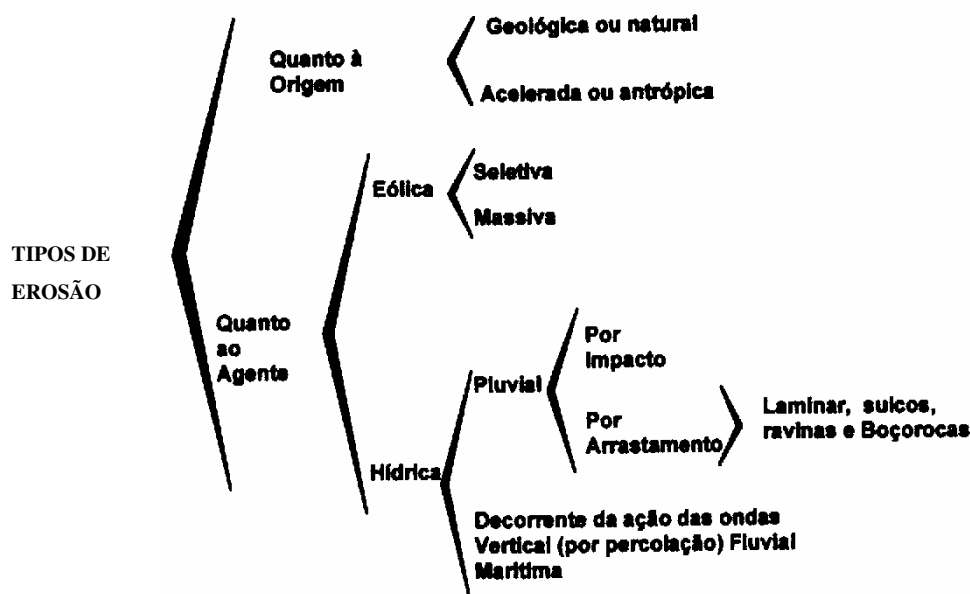


Figura 10 – Tipos de erosão (ALMEIDA FILHO, 2000).

Entende-se por ravina a forma de sulco geralmente alongado e com profundidades variáveis, normalmente inferiores a 10 metros, raramente ramificadas e não chegam a atingir o lençol freático (ALMEIDA FILHO, 2000).

As voçorocas são formadas pelos aprofundamentos das ravinas e interceptação do lençol freático, onde pode-se observar grande complexidade de processos do meio físico como *piping*, liquefação de areia e escorregamento laterais (RODRIGUES, 1982 apud ALMEIDA FILHO, 2000).

3.4.1.1 Fatores condicionantes dos processos erosivos

Os condicionantes dos processos erosivos são determinados por cinco fatores principais que determinam a intensidade dos processos, destacando-se a chuva, o solo, a topografia, a cobertura vegetal e a natureza do substrato rochoso, conforme Salomão e Iwasa (1995), Infanti Jr. e Fornasari Filho (1998).

3.4.1.1.1 Chuva

A água da chuva provoca erosão pelo impacto das gotas de água sobre a superfície do solo, caindo com velocidade e energia variáveis pelo fluxo concentrado das águas de escoamento superficial. A ação erosiva depende da distribuição pluviométrica do evento chuvoso (chuva acumulada e intensidade de chuva). A erosividade é o índice que expressa a capacidade da chuva em provocar erosão (INFANTI JR. e FORNASARI FILHO, 1998). Este mecanismo deve-se a combinação do tamanho e da velocidade das gotas de chuva com a duração das precipitações e a velocidade do vento, (MOREIRA E PIRES NETO, 1998).

Conforme Selby (1982), a erosão por pingo de chuva é reconhecida como sendo responsável por quatro efeitos: (1) desagregação dos agregados do solo como resultado de impacto; (2) rastejamento das partículas do solo; (3) saltação; (4) seleção das partículas de solo por impacto da gota de chuva que pode ocorrer como resultado de dois efeitos: o primeiro, forçando as partículas finas a entrar no solo e reduzir a taxa de infiltração e, segundo, o *splashing* seletivo de grãos destacados. A lavagem é o processo no qual as partículas do solo são retiradas e transportadas por meio de fluxo laminar.

3.4.1.1.2 Solo

As propriedades físicas do solo, principalmente a textura, estrutura, permeabilidade, densidade e as características químicas, biológicas e mineralógicas, exercem diferentes influências na erosão ao conferir maior ou menor resistência à ação das águas (SALOMÃO e IWASA, 1995).

A textura influi na capacidade de infiltração e absorção da água da chuva, e na capacidade de arraste de partículas do solo. Assim, solos arenosos são, normalmente, porosos com capacidade maior de infiltração pelas chuvas e, conseqüentemente, menor escoamento superficial. O solo arenoso possui baixa proporção de partículas de argila e maior facilidade para a erosão, mesmo quando submetido a eventos chuvosos de baixa intensidade (SALOMÃO e IWASA, 1995).

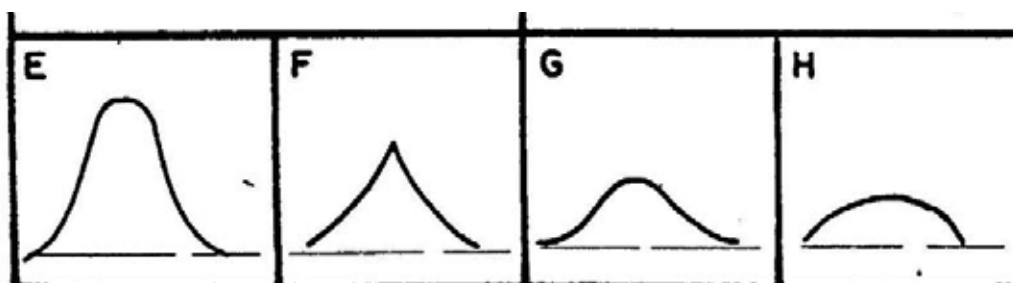
A estrutura refere-se ao arranjo das partículas do solo e influi na capacidade de infiltração e absorção da água da chuva e aumenta a resistência do solo ao arraste de partículas pela ação da chuva.

A permeabilidade determina a maior ou menor capacidade de infiltração das águas de chuva, estando diretamente relacionada à porosidade do solo. Em geral, solos arenosos são mais permeáveis do que os solos argilosos. A densidade aparente dos solos é outro fator controlador e refere-se à maior ou menor compactação dos solos. As propriedades químicas, biológicas e mineralógicas influem no estado de agregação entre as partículas, aumentando ou diminuindo a resistência do solo à erosão (SALOMÃO e IWASA, 1995).

Os solos com características latossólicas são quimicamente mais pobres em bases (Na, Ca, Mg, e outros) e ricos em sesquióxidos de Fe e Al, tendendo a apresentar uma estrutura micro-agregada ou estrutura maciça, resultando em solos com alta porosidade entre as partículas.

3.4.1.1.3 Topografia

A influência da topografia do terreno na intensidade erosiva é verificada, principalmente, pela declividade e comprimento de rampa (comprimento da encosta ou da vertente). Esses fatores interferem diretamente na velocidade do escoamento das águas pluviais. Os terrenos com maiores declividades e maiores comprimentos de rampa apresentam maiores velocidades do escoamento superficial e, conseqüentemente, maior capacidade erosiva. Todavia, uma encosta com baixa declividade e comprimento de rampa grande pode ter também alta intensidade erosiva, desde de que sujeita à grande vazão do escoamento das águas superficiais. Soares e Fiori (1976) definiram quatro tipos básicos de vertentes que se caracterizam pela atuação de diferentes processos erosivos (Figura 11).



E- côncava-retilí-neo-convexa F - côncava G- côncavo –convexa H - convexa

Figura 11 – Classificação espacial das encostas (SOARES e FIORI, 1976).

3.4.1.1.4 Cobertura Vegetal

A defesa natural do solo é a cobertura de serrapilheira (*litter*) que funciona como uma manta protetora, evitando a desagregação das partículas de solo. Entre os principais efeitos da cobertura vegetal destacam-se: proteção contra o impacto direto das gotas de chuva; dispersão e quebra da energia das águas de escoamento superficial; aumento da infiltração pela produção de poros no solo por ação das raízes; aumento da capacidade de retenção de água pela estruturação do solo por efeito da produção e incorporação de matéria orgânica (BERTONI e LOMBARDI NETO, 1990).

A relação de equilíbrio existente entre a vegetação primitiva e o solo, através do tempo geológico, aponta uma maior ação protetora para o solo. Por outro lado, no solo desprovido de vegetação, ocorre uma alteração drástica no balanço hídrico, proporcionando um aumento significativo do escoamento superficial e diminuição da infiltração (JORGE e UEHARA, 1998). Observa-se, freqüentemente, a formação de selamento do solo em decorrência de pisoteamentos e tráfegos de veículos.

A matéria orgânica incorporada ao solo permite maior agregação e coesão entre as partículas, tornando o solo mais poroso e com maior poder de retenção de água, aumentando sua capacidade de infiltração.

3.4.1.1.5 Substrato rochoso

As características litológicas do substrato rochoso, associadas à intensidade de intemperismo e a natureza da alteração e o grau de fraturamento, condicionam a suscetibilidade do material à erosão (INFANTI JR. e FORNASARI FILHO, 1998).

A erosão é função da erodibilidade e erosividade do solo, variáveis que podem ser comparadas às de outros solos ou ser criada uma escala de valores numéricos. Todos esses fatores operam juntos e são expressos na Equação Universal de Perda de Solo, (WISCHMEIER e SMITH, 1978).

$$A = RKLSCP$$

Onde:

A= perda de solo;

R= fator de erosividade da chuva;

K= fator de erodibilidade do solo;

L= fator do comprimento de encosta;

S= fator de gradiente de declividade;

C= fator de manejo do solo;

P= fator de controle de erosão.

Trabalhos de análise de erosão foram elaborados por Silva et al. (2001), Moreti et al. (2003), Griebeler (2005), Gameiro (2003), Pereira et al. (2001) e outros.

3.4.2 Assoreamento

O processo consiste na acumulação excessiva de sedimentos e/ou detritos transportados por via hídrica em local onde a deposição do material é mais rápida do que a capacidade de remoção natural pelos agentes de seu transporte (ABNT, 1989 Apud FORNASARI FILHO, 1972).

Os sedimentos são transportados e depositados devido ao processo erosivo, todavia, pode ser intensificado pelas atividades antrópicas, principalmente aquelas ligadas ao uso do solo sem o devido manejo, como: aumento da erosão pluvial, práticas agrícolas inadequadas, desmatamento de cabeceiras e margem de drenagem, modificação da velocidade d'água por alterações nos rios (barragens, desvios, pontes, entre outras) e mineração (INFANTI JR. e FORNASARI FILHO, 1998).

O assoreamento pode causar problemas de perda de volume de reservatório, redução da água para abastecimento, redução da profundidade de canais, perda de eficiência de obras hidráulicas, produção de cheias, alteração na qualidade da água, perda da biodiversidade aquática e prejuízo ao lazer (OLIVEIRA, 1995).

3.4.3 Enchente e inundações

As enchentes correspondem ao extravasamento das águas de um curso de água para as áreas marginais, quando a vazão a ser escoada é superior à capacidade de descarga da calha. A inundação está geralmente associada à enchente ou cheia (acréscimo na descarga por certo período de tempo), ao assoreamento de canal, barramentos ou remansos (BAKER et al., 1988 apud INFANTI JR. E FORNASARI FILHO, 1998).

As inundações são processos naturais do meio físico, podendo ser dinamizadas pelo uso e ocupação indevido do solo, tornando-se um dos problemas prioritários nas questões ambientais urbanas.

Para determinação da suscetibilidade à inundação, as principais características da bacia hidrográfica são: as características morfométricas (área e forma), dos canais de vazão (vazão, comprimento e declividade) e das planícies de inundação (extensão da área inundável), pluviometria (intensidade e duração) e o tipo de cobertura vegetal (COOKE e DOORNKAMP, 1990; FORNASARI FILHO, 1972; TUCCI, 2001).

Nas trajetórias dos rios, os trechos com grande declividade produzem escoamento em alta velocidade. As áreas baixas, no qual o relevo é relativamente plano, onde existe ocupação, são mais propícias a apresentar alto risco de inundação.

Os canais fluviais apresentam cheias anuais, associadas ao regime climático na bacia hidrográfica (Figura 12). As cheias referem-se às maiores vazões diárias ocorridas em cada ano, independente do fato de causarem ou não inundação.



Figura 12 – Tipos de leitos fluviais (CHRISTOFOLETTI, 1980).

O desenvolvimento urbano provoca alterações hidrológicas profundas no meio físico. Com o crescimento das impermeabilizações vieram os aumentos dos volumes de escoamento superficial. As estruturas hidráulicas, anteriormente construídas e dimensionadas para uma determinada vazão, passam a ser insuficiente face às novas vazões efluentes, acarretando o aumento progressivo da incidência de eventos de inundação.

O estudo de áreas de inundação tem sido estudado sob diversas óticas: os engenheiros concentram-se seus estudos na hidráulica e nas propriedades físicas do canal fluvial (TUCCI, 2001); os climatólogos analisam as relações entre os fatores climáticos/meteorológicos e a ocorrência dos eventos; os geólogos analisam as características do meio físico aos processos (AUGUSTO FILHO, 1995; CERRI, 1990; ZUQUETTE, 1993; ZAINÉ, 2000).

3.4.4 Movimento gravitacional de massa

Este processo pode ser definido como todos aqueles que são induzidos pela aceleração gravitacional e em movimento de transporte de massa, onde o material movimentado é transportado por um meio qualquer, como: água, gelo ou ar.

Os escorregamentos, geralmente, estão associados à dinâmica das encostas, caracterizadas por diferentes energias potenciais, dependendo de sua declividade. A água é o agente deflagrador deste processo que ocorre com maior frequência no período chuvoso.

Os mecanismos que contribuem diretamente para as instabilizações das encostas são: o aumento do nível de água e a geração de forças de percolação; o preenchimento temporário de fendas, trincas, estrutura em solos saprolíticos e rochas (fraturas e juntas) com geração de pressões hidrostáticas; a formação de frente de saturação reduzindo a resistência dos solos pela perda de coesão aparente. Os movimentos gravitacionais de massa relacionados às encostas são agrupados em quatro grandes classes de processos: rastejo, escorregamentos, quedas e corridas (AUGUSTO FILHO, 1992).

As modificações oriundas das ações antrópicas no meio provocam a indução dos movimentos gravitacionais de massa, como remoção da cobertura vegetal, lançamento e concentração de águas pluviais e servidas, vazamento na rede de abastecimento, esgoto e presença de fossas, execução de cortes em geometria incorreta, execução deficiente em aterros e lançamento de lixo nas encostas (AUGUSTO FILHO, 1995).

3.4.5 Subsidência e colapso

O processo de subsidência consiste na deformação ou deslocamento de direção essencialmente vertical descendente, manifestando-se por afundamentos de terrenos. O colapso corresponde à movimentação brusca de terreno, enquanto que a subsidência é mais lenta (INFANTI JR. e FORNASARI FILHO, 1998).

Este processo pode ocorrer por causas naturais (carstificação, acomodação de camadas, movimentação segundo planos de falhas) e por atividades antrópicas (bombeamento de água subterrânea, recalque de fundação), além de considerar áreas de *piping* cujo movimento das águas subsuperficiais pode transportar grandes proporções de sedimentos.

3.4.6 Alterações tecnogênicas

O termo tecnógeno destaca a importância em considerar que os eventos resultantes da ação do homem refletem uma ação técnica. O estágio evolutivo da técnica implica formas e intensidades diferentes da ação do homem no ambiente, resultando em diferentes impactos, (OLIVEIRA, 1995). O homem passa a transformar a natureza segundo seu interesse, geralmente sem levar em consideração as fragilidades do ambiente.

A caracterização do tecnógeno resulta da comparação que pode ser feita entre os processos naturais e os processos antrópicos na transformação do ambiente. O homem tem um curto período de vida na Terra comparado à magnitude do tempo geológico, porém, é capaz de acelerar, consideravelmente, as intensidades dos processos naturais (Tabela 8).

Oliveira (1995) classifica os depósitos tecnogênicos em três tipos principais: *construídos* (aterros, corpos de rejeitos etc.); *induzidos* (assoreamentos, aluviões modernos etc.) e *modificados* (depósitos naturais alterados tecnogenicamente por efluentes, adubos etc.).

Peloggia (1999 apud OLIVEIRA, 2005) propõe outra classificação para os depósitos tecnogênicos e engloba a classificação de Oliveira (1995) em: *depósitos de 1ª ordem*; os de *2ª ordem*, denominados *remobilizados* (como exemplo, depósitos de fundo de vale, formados por escorregamentos de aterro) e *retrabalhados*, termo proposto por Nolasco (2002), tendo como exemplo, os aterros ravinados.

Peloggia (1998) realiza estudos específicos sobre os problemas geológicos da apropriação do relevo no espaço urbano do município de São Paulo, destacando os depósitos tecnogênicos e caracterizando as formas essenciais da substituição dos processos naturais por processos geológicos, marcadamente influenciados pela ação antrópica.

Candido e Zaine (2005) realizaram mapeamento geológico-geotécnico em Estiva Gerbi na escala 1:25.000 sendo individualizada seis unidades, onde foram identificadas onze pilhas de bota-fora, classificadas como do tipo espólico.

Tabela 8 - Correlação entre os processos naturais e Tecnogênicos, conforme Ter Stepanian (1988).

PROCESSOS NATURAIS (ações e fatores geológicos e biológicos)	PROCESSOS TECNOGÊNICOS (ação do homem)
Intemperismo físico	Desmonte de rochas em minas, construtivismo.
Intemperismo químico	Modificações provocadas por processos de engenharia química, irrigação e lançamento de rejeito.
Formação de relevo	Modificação do relevo pelos cortes de estrada, cidades, canais, mineração e outros.
Formação do solo	Alteração das características pelo uso de fertilizantes, produtos químicos, lançamento de rejeitos, desmatamento, adição de matéria orgânica, irrigação e outros.
Desenvolvimento dos sistemas de drenagens	Mudanças nos ritmos do desenvolvimento do sistema, devido às construções de reservatórios.
Formação de meandros	Retificação de rios
Processos costeiros	Modificações causadas pelas construções de portos, aterros e obras "offshore".
Químicas das águas subterrâneas	Infiltrações de soluções dos depósitos de rejeitos, combustíveis e outros.
Químicas das águas superficiais	Lançamento de resíduos no sistema de drenagem e carreado pelas águas de escoamento superficial
Erosão	Ocupação inadequada e alteração do coeficiente de escoamento das águas superficiais.
Sedimentação	Formação de depósitos tecnogênicos.

Os depósitos relacionados à erosão que se formam em fundo de vale, rios e reservatórios, construídos ou induzidos, contendo sedimentos e materiais poluídos, podem ser remobilizados e, quando reutilizados, podem causar graves danos do homem. Como exemplo, na área de estudo, o igarapé que escoava para o reservatório é considerado pelos moradores como depósito de lixo.

3.4.7 Contaminação de água

A água pode ser utilizada pelo homem de diversas maneiras, para o abastecimento humano, industrial, irrigação, recreação, estético, pastoril, preservação da fauna e flora, geração de energia elétrica, transporte, diluição e afastamento de dejetos.

Na década de 1980, a sociedade começou a despertar para os conflitos de uso dos recursos hídricos e como preservar e garantir o acesso às reservas hídricas nas diversas regiões do Brasil. Os problemas de escassez hídrica estão relacionados à combinação do crescimento exagerado das demandas localizadas e da degradação da qualidade das águas. O crescimento

demográfico e o desenvolvimento sócio-econômico são, freqüentemente, acompanhados de um rápido aumento na demanda de água, especialmente nos setores industriais e domésticos.

A escassez de água tem sido intensificada e a saúde humana gravemente afetada pela aceleração da contaminação de recursos de água potável, especialmente em regiões de urbanização intensa (SETTI et al., 2001).

Os mananciais apresentam diversos impactos considerando os múltiplos usos. A eutrofização, presença de metais pesados, acidificação, poluentes orgânicos, efluentes tóxicos e outros, degradam os corpos hídricos, principalmente em áreas densamente povoadas. A poluição assume alta magnitude quando atinge as águas subterrâneas, onde a contaminação é lentamente diluída e as práticas de remediação são extremamente honerosas.

A maior prioridade nacional em recursos hídricos e saneamento é a reversão urgente do dramático quadro do desperdício e poluição dos corpos de água para níveis compatíveis à sustentabilidade (REBOUÇAS; BRAGA e TUNDISI, 1999).

As águas subterrâneas constituem 97% da água doce disponível no planeta. O aproveitamento tem aumentado, consideravelmente, em função da degradação dos mananciais superficiais e do desenvolvimento industrial e agropecuário.

A abundância desse recurso é função das características geológicas e climáticas de uma dada região. A permeabilidade e a porosidade da rocha ou sedimentos definem a capacidade do aquífero em transmitir, armazenar e fornecer água.

A poluição das águas subterrâneas pode ocorrer de duas maneiras: uma, pelo transporte dos poluentes pelas águas de chuva, que se infiltram até alcançar o lençol freático; e outra, quando os poluentes já atingiram o aquífero, e se locomovem lateralmente. A contaminação ocorre quando alguma alteração na qualidade da água coloca em risco a saúde ou bem-estar do homem.

Os poluentes são produtos de ação antrópica, principalmente oriundos de atividades domésticas, industriais, agrícolas e de extração mineral. Os principais contaminantes são os organismos patogênicos (bactérias e vírus) e os metais pesados com baixa mobilidade (Cd, Cr, Pb e Hg), compostos inorgânicos, orgânicos sintéticos, halogenados e hidrocarbonetos. Esses compostos são altamente tóxicos e bastantes persistentes em sub-superfície, de modo que pequenas quantidades desses líquidos podem gerar grandes plumas de contaminação (HIRATA, 2001).

Entre os compostos inorgânicos, o nitrato é o contaminante de ocorrência mais ampla em aquíferos, cujas fontes são os sistemas de saneamento *in situ*, como fossas e latrinas, e os

fertilizantes nitrogenados na agricultura. O nitrato possui grande mobilidade e persistência em condições aeróbicas (HIRATA, 2001). Os aquíferos freáticos próximos a essas fontes são muito vulneráveis à contaminação. Eventualmente, a contaminação pode ocorrer por mecanismos naturais, como o Fe, Mn e F e em concentrações menores Ar, Cr, Ni, Zn, Cu, entre outros.

A pecuária extensiva, a plantação de cana-de-açúcar e os agrotóxicos usados no cultivo do café e da soja aumentam os danos. As enchentes e cheias contribuem para a perda da qualidade da água.

Na cidade de São José do Rio Preto (SP), em áreas mais antigas da zona central, após um monitoramento de quase um ano em 36 poços, foram obtidos teores de nitrato ($N-NO_3$) de 15, 18 até 20 mg/litro. Os poços mais rasos são os mais atingidos, tendo os teores diminuído com a sazonalidade. Esse contaminante provoca problemas de metahemoglobinemia em lactantes e doenças cancerígenas, principalmente gástricas, colocando em perigo a vida da população, (BARCHA e BRANCO, 1991).

Quase todos os usos que o homem faz da água resultam na produção de resíduos, os quais são novamente incorporados aos recursos hídricos, causando a sua poluição. Considerando a utilização múltipla dos recursos hídricos, alguns usos podem ocasionar perdas na qualidade e quantidade de água, com repercussão sobre a utilização da água e, por vezes, com conseqüências maléficas para o homem e o ambiente.

A poluição das águas subterrâneas é uma das grandes preocupações deste século, principalmente com os aquíferos livre, sobretudo, em lugares onde a zona não saturada é delgada e o lençol freático pouco profundo. Os aquíferos freáticos são muito ameaçados em lugares onde não há rede de esgoto e as águas são lançadas em fossas ou latrinas, como foi o caso na área de estudo, da invasão Recanto Verde e Vila Itamar que ocupou os tabuleiros (área de recarga) do Parque Estadual do Bacanga – MA.

Entende-se por vulnerabilidade o conjunto de características do aquífero que determina o quanto ele poderá ser afetado pela ação de determinado poluente (SILVA, 2004).

A vulnerabilidade é aplicada para representar a caracterização intrínseca que determina a sensibilidade de uma parte do aquífero a ser adversamente afetada por uma carga poluente imposta. A carga poluente pode ser controlada ou modificada, mas não a vulnerabilidade do aquífero (FOSTER et al., 2002).

3.5 Métodos de Avaliação da Vulnerabilidade

Os métodos para determinação da vulnerabilidade de um aquífero utilizam, em geral, parâmetros hidrogeológicos e morfológicos do meio físico, por vezes de difícil aquisição. A adoção de índices de vulnerabilidade tem a vantagem de eliminar ou minimizar a subjetividade inerente aos processos de avaliação. Vários métodos são utilizados para determinação da vulnerabilidade, sendo arbitrárias as delimitações das áreas a partir de valores relativos, na maioria das vezes. Os métodos de caracterização da vulnerabilidade mais utilizados são GOD, DRASTC, AVI e sobreposição de mapas.

3.5.1 Método GOD

O método GOD (*Groundwater occurrence, Overall lithology of the unsaturated zone, Depth to the water table*), desenvolvido por Foster e Hirata (1988) e aperfeiçoado por Foster et al. (2002) utiliza informações freqüentemente acessíveis em países em desenvolvimento.

A vulnerabilidade natural à contaminação do aquífero é uma característica intrínseca dos estratos geológicos que separa a zona saturada da não saturada, a qual determina a sua sensibilidade para ser afetada por uma carga contaminante adversa. Podendo depender da acessibilidade da zona saturada para a penetração do poluente e da capacidade de atenuação dos estratos geológicos da zona não saturada ou vadosa, através da retenção físico-química ou da reação dos poluentes, (FOSTER, VENTURA e HIRATA, 1987).

Conforme Andersen e Gosk (apud FOSTER et al., 2002) o grau de atenuação do contaminante pode variar significativamente dependendo do tipo do contaminante, sendo mais consistente avaliar a vulnerabilidade natural à poluição para um poluente ou uma classe específica (nutrientes, patogêneses, microorganismos, metais pesados e outros) ou para uma atividade fonte de poluente (esgoto sanitário, agricultura, disposição de efluentes industriais).

O mapeamento da vulnerabilidade baseada em índices absolutos é muito utilizado para o planejamento do uso do solo e controle de descarga de efluentes. Os índices absolutos são claramente definidos para as classes de vulnerabilidade (Tabela 9).

Tabela 9 - Classes de vulnerabilidade de contaminação de aquífero (FOSTER et al., 2002).

CLASSES DE VULNERABILIDADE	DEFINIÇÃO
Extrema	Vulnerável à maioria dos poluentes da água com rápido impacto em muitos cenários de poluição.
Alto	Vulnerável a vários poluentes (exceção para os fortemente absorvidos) em muitos cenários de poluição.
Moderado	Vulnerável a alguns poluentes porém somente quando continuamente descartado ou em situação de vazamento.
Baixa	Somente vulnerável a poluentes conservativo (baixa mobilidade) quando continuamente e largamente descartados ou em situação de vazamento.
Desprezível	Presente em camadas confinadas com insignificante fluxo subterrâneo vertical.

3.5.1.1. Aplicação do índice GOD de vulnerabilidade

O método utiliza os seguintes parâmetros:

G = ocorrência de água subterrânea, indicação do tipo de confinamento do aquífero, com índice que varia de 0 – 1.

O = características litológicas da zona vadosa em termos de grau de consolidação (presença e ausência de fissura) e tipo de litologia (porosidade, permeabilidade, umidade da zona não saturada ou especificar a retenção), que determinem a capacidade de atenuação do contaminante. O índice varia de 0,4 – 1,0.

D = estimativa da profundidade do aquífero confinado ou não confinado. Este índice varia de 0,6 – 1,0.

Finalmente, têm-se os índices de vulnerabilidade, que são obtidos pela integração desses dados, geralmente empregando Sistema de Informação Geográfica – SIG ou

superposição de mapas. As classes de vulnerabilidade são: negligenciável, baixa, moderada, alta , extrema (FIGURA 13).

As dificuldades mais frequentes na aplicação da metodologia proposta para a avaliação da vulnerabilidade, conforme (FOSTER e HIRATA, 1991; FOSTER et al., 2002), são as seguintes:

- A presença de estratos de cobertura do aquífero com grandes diferenças de permeabilidade;
- Incertezas na avaliação na capacidade de atenuação do leito dos canais perenes e intermitentes;
- Exploração excessiva do aquífero para suprimento de água, podendo causar rebaixamento do nível de água subterrâneo e também afetar o grau de confinamento do aquífero;
- Camadas de argilas compactadas ou potencialmente fraturadas para as quais as componentes principais de direção de fluxos preferenciais são incertas;
- Não utiliza dados de recarga do aquífero;

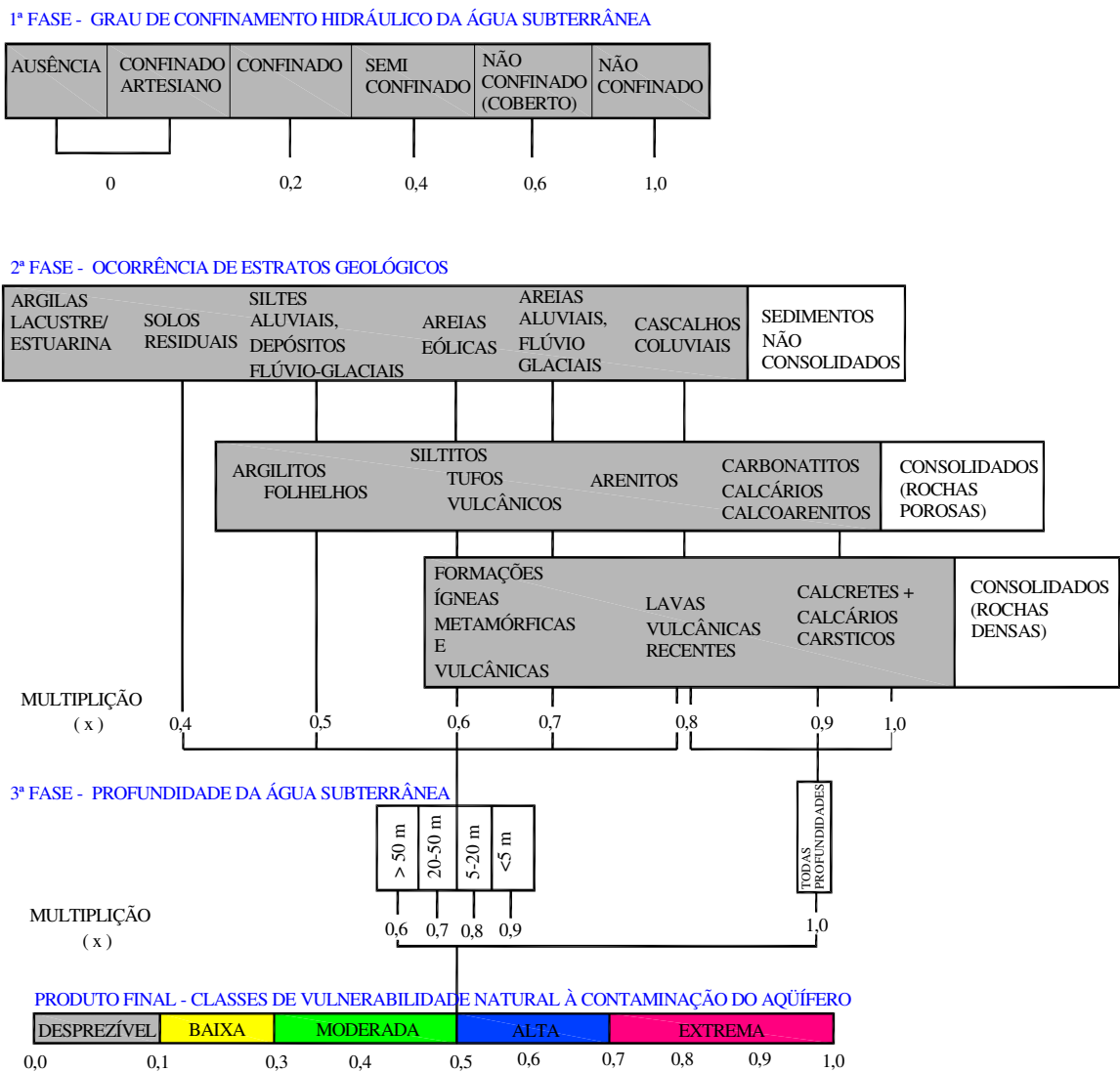


Figura 13 - Seqüência das fases do método GOD para avaliação da vulnerabilidade natural a contaminação das águas subterrânea, adaptada (FOSTER et al., 2002).

Os mapas de vulnerabilidade devem ser interpretados em termos relativos, pois a princípio todos os aquíferos são vulneráveis a contaminantes persistentes com ampla dispersão, neste caso, a capacidade de diluição do aquífero pode não ser efetiva para mitigar a contaminação. Adicionalmente, os aquíferos que seriam considerados como de baixa vulnerabilidade natural à contaminação, em termos gerais, tendem a ser os mais difíceis de remediar uma vez contaminados (FOSTER e HIRATA, 1991).

Algumas aplicações dos métodos de vulnerabilidades são encontradas em Paralta e Francês (2000), Guiguer e Kohnke (2002), Ferreira (2001), Meaulo (2004), Bovolato (2005), Kohnke (2005), e outros.

3.5.2 Método DRASTIC

O método DRASTIC foi desenvolvido pela EPA para ser um sistema padronizado utilizado para definir quais áreas devem ser protegidas para garantir a integridade do aquífero em termos de poluição.

O modelo considera sete fatores hidrológicos aos quais são atribuídos números **r** de 1 a 10, dependendo da faixa de valores. Estes são multiplicados por pesos **w** que variam de 1 a 5, sendo que o fator mais significativo recebe o peso 5 e o menos significativo, 1. Este modelo não foi desenvolvido para casos em que o poluente é introduzido em profundidade, caso de vazamento em tanques enterrados, lagoas de resíduos ou poços de injeção. Os parâmetros considerados são os seguintes, conforme Aller et al. (1987), Kohnke (2005).

- 1- Profundidade do nível da água (D). Peso 5 (D = Depth to Water Table);
- 2- Recarga do aquífero (R). Peso 4 (R = Net Recharge);
- 3- Litologia do aquífero (A). Peso 3 (A = Aquifer Média);
- 4- Tipo de solo (S). Peso 2 (S = Soil Média);
- 5- Topografia local (T). Peso 1 (T = Topograghy);
- 6- Textura da zona vadosa (I) . Peso 5 (I = impact of the vadose zone media);
- 7- Condutividade hidráulica do aquíferos (C). Peso 3 (C = Aquifer Hydraulic Conductivity).

$$\text{ÍNDICE DRASTIC} = DrDw + RrRw + ArAw + SrSw + TrTw + IrIw + CrCw$$

3.5.3 Método AVI

O método do índice AVI (Índice de Vulnerabilidade do Aquífero) foi desenvolvido no Canadá pelo National Hydrology Research Institute (VAN STEMPVOORT, EWERT e WASSENAAR, 1992). O método baseia-se em dois parâmetros físicos: espessura de cada camada sedimentar acima da zona saturada mais próxima da superfície (**di**) e condutividade hidráulica estimada de cada uma destas camadas (**Ki**).

$$\text{Baseado nesses parâmetros calcula-se a resistência hidráulica (C), } C = \sum \left(\frac{di}{Ki} \right) . A$$

relação entre a vulnerabilidade e a resistência hidráulica é apresentada na Tabela 10.

Tabela 10 - Classe de vulnerabilidade do índice AVI, (VAN STEMPVOORT, EWERT e WASSENAAR, 1992).

Resistência Hidráulica (ano)	Vulnerabilidade
0-10	Extremamente alta
10-100	Alta
100-1000	Moderada
1000-10000	Baixa
> 10000	Extremamente

3.5.4 Método de sobreposição de mapas

O método de simples cruzamento gera dados com representação temática a partir de uma matriz de correlação onde são atribuídos valores relativos de alta, média e baixa, considerando a importância de cada atributo para a finalidade proposta. Os mapas são cruzados de par em par, manualmente, com o auxílio de mesa de luz (*overlay*), possibilitando a reclassificação das classes. O resultado obtido é expresso espacialmente por meio de polígonos, que representam as classes consideradas..

Na sobreposição simples dos mapas ou cartas, os dados são selecionados com base nos principais atributos utilizados na análise e hierarquizados, conforme os objetivos do trabalho, sendo utilizada uma matriz de avaliação que orienta o mapeador na elaboração dos novos limites. Nesta técnica, os mapas ou cartas são sobrepostos dois a dois. Recomenda-se a utilização de Sistemas de Informações Geográficas quando se analisar grandes áreas.

Uma das principais desvantagens deste método é assumir que todos os atributos considerados podem ser descritos e medidos exatamente com peso iguais, apesar de se atribuir uma valoração relativa quando se faz a associação dos parâmetros. Esta superposição foi considerada não realística (BUNOUGH e HENVELINK, 1992). Detalhes sobre o simples cruzamento são encontrados em Moreira (2001), Zuquette e Gandolfi (2004).

Muitas análises de vulnerabilidade utilizando sobreposição de mapas ou cartas das principais informações do meio físico foram realizadas por Nishimura e Zuquette (1994), Narciso e Gomes (2005), Zaine (2000), Moreira (2001), entre outros.

Neste trabalho foi utilizado a método GOD pois fornece indicação do tipo de confinamento do aquífero, características litológicas e a profundidade da água subterrânea, sendo essas informações de fácil aquisição, apesar da valoração dos índices ser considerada

relativa, quando comparadas com o método DRASTIC que utiliza 7 variáveis e tem como resultado apenas um índice e os pesos atribuídos para as variáveis podem não ser significante para a área considerada. O método AVI utiliza apenas dois parâmetros como o potencial de recarga e a profundidade do N.A., às vezes de difícil aquisição.

O método GOD é muito utilizado na América Latina e a avaliação da vulnerabilidade natural à contaminação de aquíferos e é um dos instrumentos indispensáveis para subsidiar o planejamento do uso do solo e gestão ambiental.

IV CARACTERIZAÇÃO DA BACIA

4.1 Localização

A área selecionada para estudo corresponde à Bacia Hidrográfica do Rio Bacanga, considerada, assim, como uma unidade de análise. Esta área sofre diversos impactos ambientais com o aumento da população e ocupação desordenada que provocam a diminuição das áreas verdes e aumentam das áreas impermeabilizadas, alterando a dinâmica hidrológica da bacia.

A bacia do Rio Bacanga, localiza-se na cidade de São Luís, na porção noroeste da ilha, entre as coordenadas Universal Transversa de Mercator – Projeção UTM, fuso 23S; 9706000/9722000 mN e 573000/585000 mE. O acesso rodoviário principal se faz pela BR-135, após atravessar o Estreito dos Mosquitos, canal que liga a ilha ao continente maranhense (Figura 14).

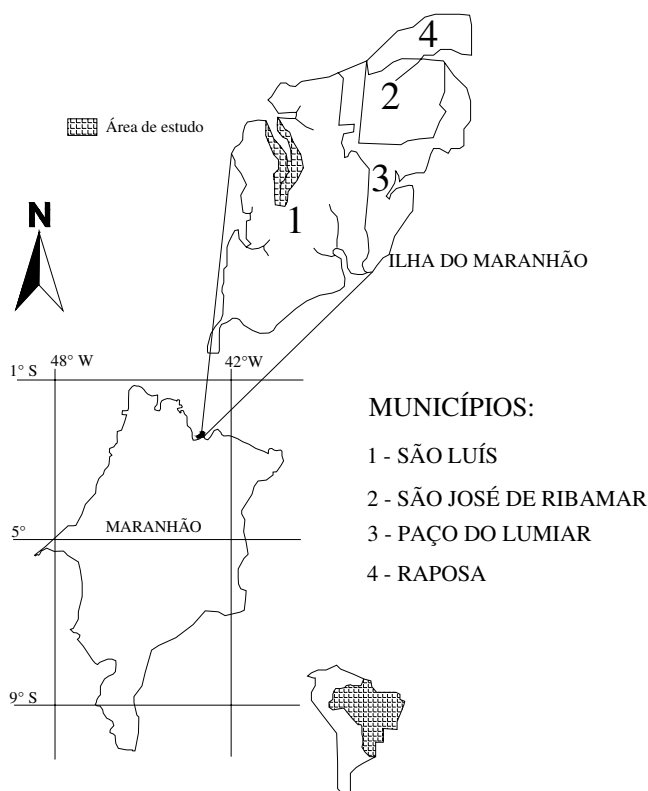


Figura 14 - Mapa de localização da Bacia do Rio Bacanga.

4.2 Histórico

O crescimento da cidade de São Luís ocorreu em direção aos estuários dos Rios Bacanga e Anil. No início, a ocupação espacial era em função da defesa do território e a expansão ocorreu em direção W-E (FERREIRA, 1993).

Na década de 50, o Rio das Bicas, importante afluente da Bacia do Rio Bacanga pela margem direita, era um recurso hídrico de grande importância para os moradores de bairros como: Fátima, João Paulo, Sacavém e algumas comunidades, as quais retiravam alimentação para subsistência e comercializavam de peixes, caranguejos, siris e camarões.

Com o crescimento da população, várias áreas ribeirinhas, de mangue e de praia da Bacia do Rio Bacanga foram aterradas. Segundo Lopes (1916 apud MARANHÃO, 1997), “São Luís ganha sobre o mar uma ampla área, onde a cidade poderá se estender à farta”.

O Rio Bacanga representava um obstáculo natural à ligação rodoviária entre São Luís e o Porto do Itaqui e considerando que o rio representava o depositário de dejetos de descarga *in natura* da cidade, optou-se pela construção da barragem de terra transversal ao estuário. O mecanismo hidrodinâmico por ocasião das preamares controlaria a entrada e saída de água. O volume represado funcionaria como uma bacia sanitária de decantação (PITOMBEIRA e MORAIS, 1979).

No início da década de 80, houve um incremento no desenvolvimento da cidade de São Luís com a implantação dos grandes projetos: o Consórcio Alumiar e o sistema mina-ferrovia-porto da Companhia Vale do Rio Doce (CVRD), localizados no distrito industrial, que atraíram um forte contingente populacional para a ilha.

A expropriação de uma grande população esparsa, que habitava o oeste da ilha, para implementação do Consórcio Alumiar, além de influenciar a vinda de um grande contingente de pessoas à ilha, causou um considerável aumento do número de palafitas que deram origem a grandes ocupações próximas ao centro urbano, surgindo bairros desordenados sem infraestrutura, saneamento e planejamento urbano. Entre esses, destacam-se: Areinha, Coroadado, Coroadinho, Anjo da Guarda, Vila Nova, Vila Embratel, Vila Bacanga, Sá Viana I e Sá Viana II (MARANHÃO, 1997). Todos esses bairros estão inseridos na área da Bacia do Rio Bacanga.

A aglomeração urbana e rural da Ilha do Maranhão indica valores de 1.147.874 hab (IBGE, 2000), sendo a população estimada para São Luís de 923.526 habitantes, representando 80,4 % da população da ilha.

Na bacia ocorre um acelerado processo de ocupação por sítios urbanos e industriais, comprometendo, de forma significativa, as condições sanitárias, áreas de recargas de aquíferos e paisagísticas do meio físico com reflexos sobre a qualidade de vida da população ludovicense.

O Rio Bacanga é fortemente influenciado pelas marés, que chegam atingir cotas de sete metros de amplitude, condicionando a formação de uma cunha de água salgada no interior da bacia por ocasião das preamares.

A Barragem do Batatã foi construída em 1964 pelo Departamento Nacional de Obras e Saneamento (DNOS). Tem comprimento de 485 metros e altura máxima de 17 metros. O reservatório de acumulação de água comporta 4.600.000 m³ e recebe água da própria bacia e contribuição do Rio da Prata e Rio Maracanã. A captação instalada tem capacidade para retirar até 283 litros/segundo no período chuvoso, e em média 52,5 litros/segundo na estiagem (CAEMA, 2005). As reservas de água são de grande importância para o abastecimento da população ludovicense (Foto 1).



Foto 1 - Vista parcial do Reservatório Batatã (Prefeitura Municipal de São Luís, 2002).

Nesta bacia localiza-se o Parque Estadual do Bacanga. Seu plano de manejo foi elaborado em 1992, fornecendo diretrizes básicas para preservação e conservação. No entanto, sua implementação foi ineficaz frente ao elevado nível de degradação presente nas áreas do Parque, como: granja, extração mineral, áreas de lazer sem monitoramento e planejamento, áreas devastadas usadas para agricultura, invasões (Recanto Verde e Vila Itamar), desmatamentos e queimadas, que deixam o solo exposto e vulnerável.

O Parque Estadual do Bacanga vem perdendo sua área verde com o passar dos anos. Atualmente, dispõe de uma área verde de 2.634 hectares (MARANHÃO, 2002). Em decorrência das pressões de ocupação, principalmente por conjuntos residenciais de classe média e invasões, localizados nos arredores do Parque, que têm se expandido em direção às áreas protegidas.

A leste do Parque Estadual do Bacanga, na área do divisor de águas da bacia, encontram-se os tabuleiros com altitudes de até 60 m, aqui definidos como zona de recarga do aquífero. A importância desta área reforça a necessidade de conhecimento das características

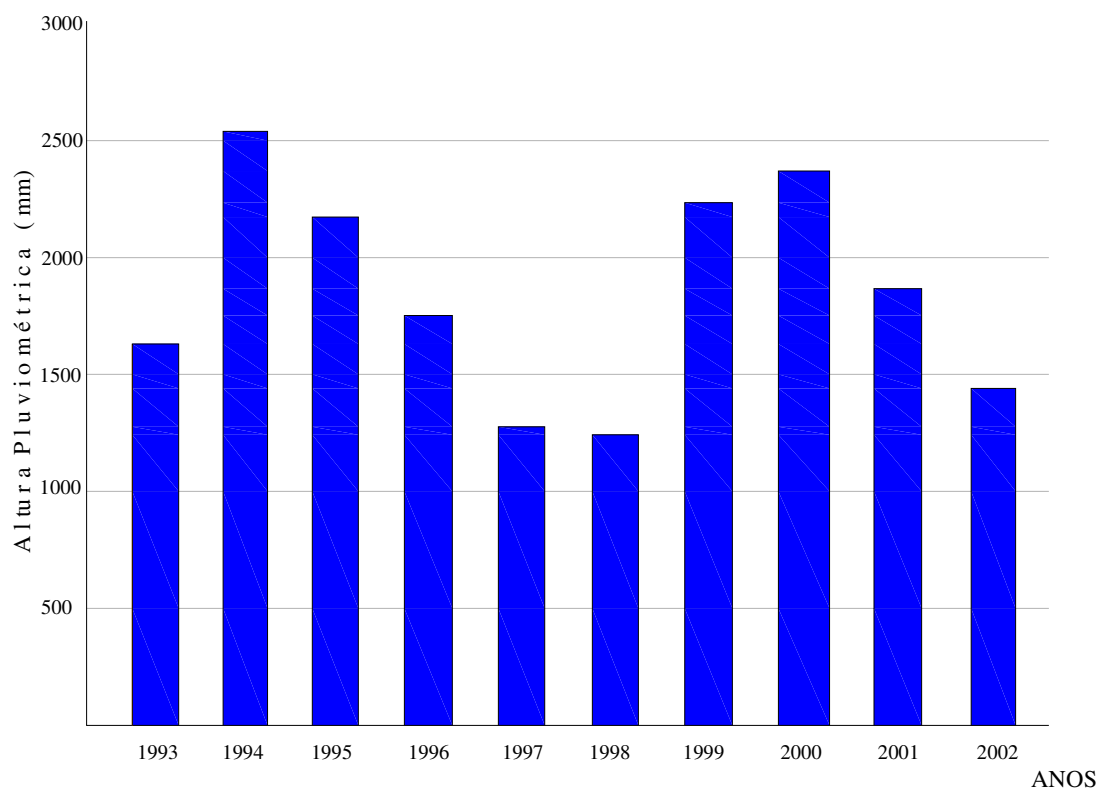
do meio físico para melhor utilização de seus espaços e de uma avaliação de sua vulnerabilidade à contaminação.

4.3 Clima

A Ilha do Maranhão se insere na área de transição climática do semi-árido nordestino e tropical úmido amazônico, sendo considerado como um clima tropical chuvoso, com estação seca de inverno, tipo Aw, conforme a classificação de Köppen (STRAHLER, 1960).

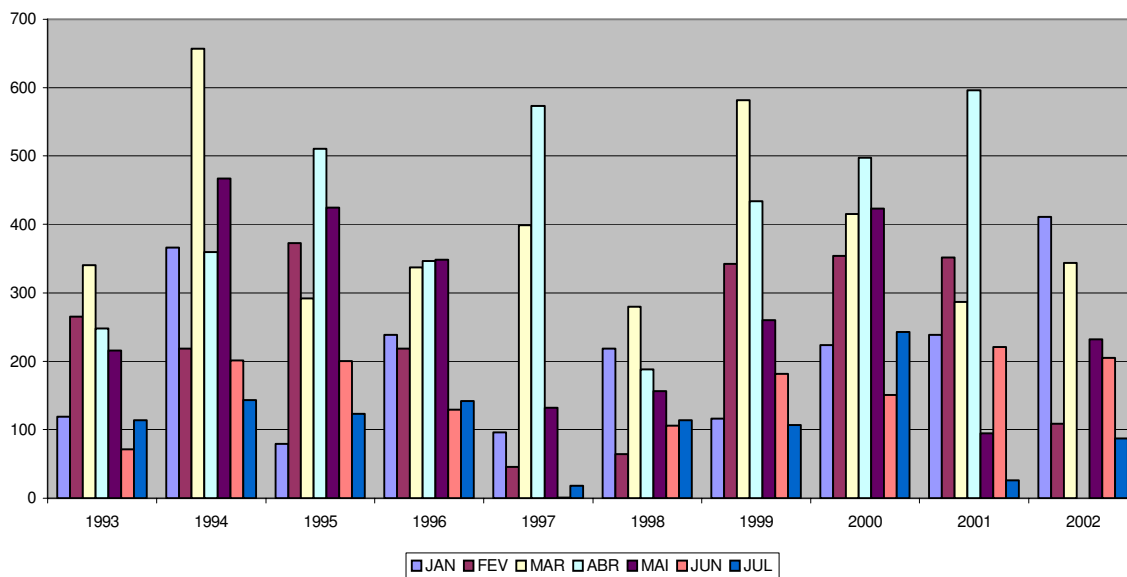
A análise da série temporal dos dados climatológicos do período 1993 –2003, da Estação Meteorológica Cunha Machado – Tirirical, situada na extremidade oriental da Bacia do Bacanga, indicam o comportamento da precipitação na área.

A chuva apresenta média anual de 1.857,16 mm com valor mínimo anual de 1.239,5 mm e máximo de 2.563,9 mm (Figura 15), temperatura média anual de 27°C e umidade média anual de 80%. A sazonalidade da chuva na área é marcante indicando o período chuvoso de janeiro a junho e o período seco de julho a dezembro (Figuras 16 e 17).



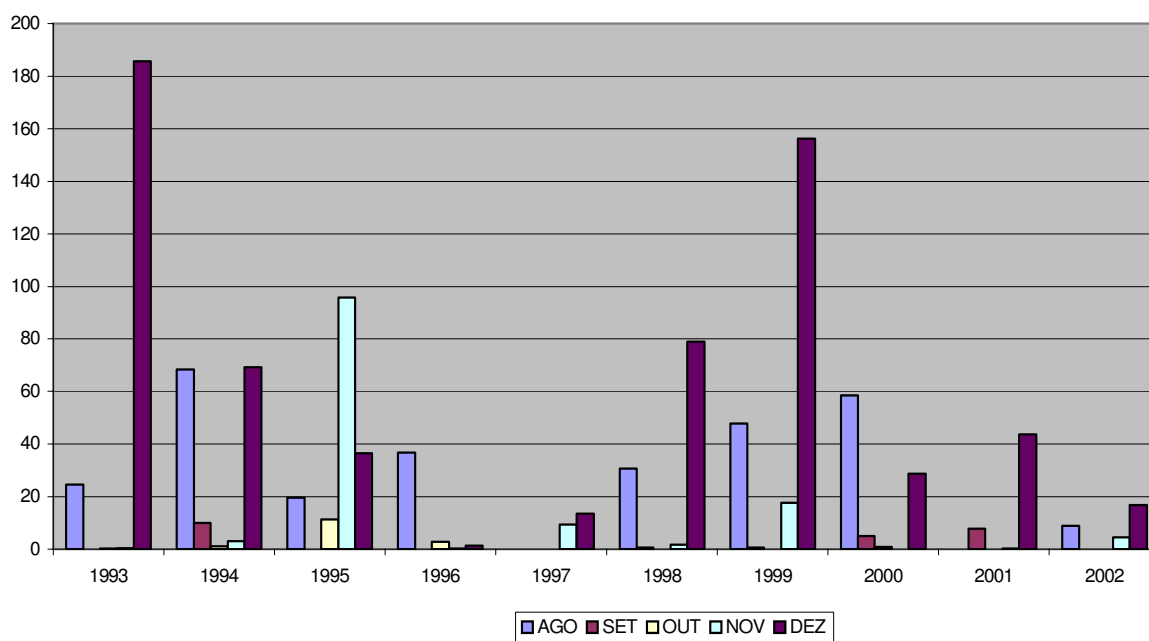
Fonte : Estação Meteorológica Cunha Machado – Tirirical

Figura 15 - Altura pluviometrica anual – 1993/2002.



Fonte : Estação Meteorológica Cunha Machado - Tirirical

Figura 16 - Altura pluviométrica mensal – período chuvoso



Fonte : Estação Meteorológica Cunha Machado - Tirirical

Figura 17 - Altura pluviométrica mensal – período seco.

O balanço hídrico da chuva indica um excedente hídrico de até 3.500 mm no período de janeiro a agosto chegando a chover de 13 a 25 dias no mês. O déficit hídrico ocorre de setembro a novembro, neste período chove em média 2 dias em cada mês. As chuvas de dezembro em média ocorrem em 6 dias promovendo uma reposição de água no solo (Figuras 18 e 19).

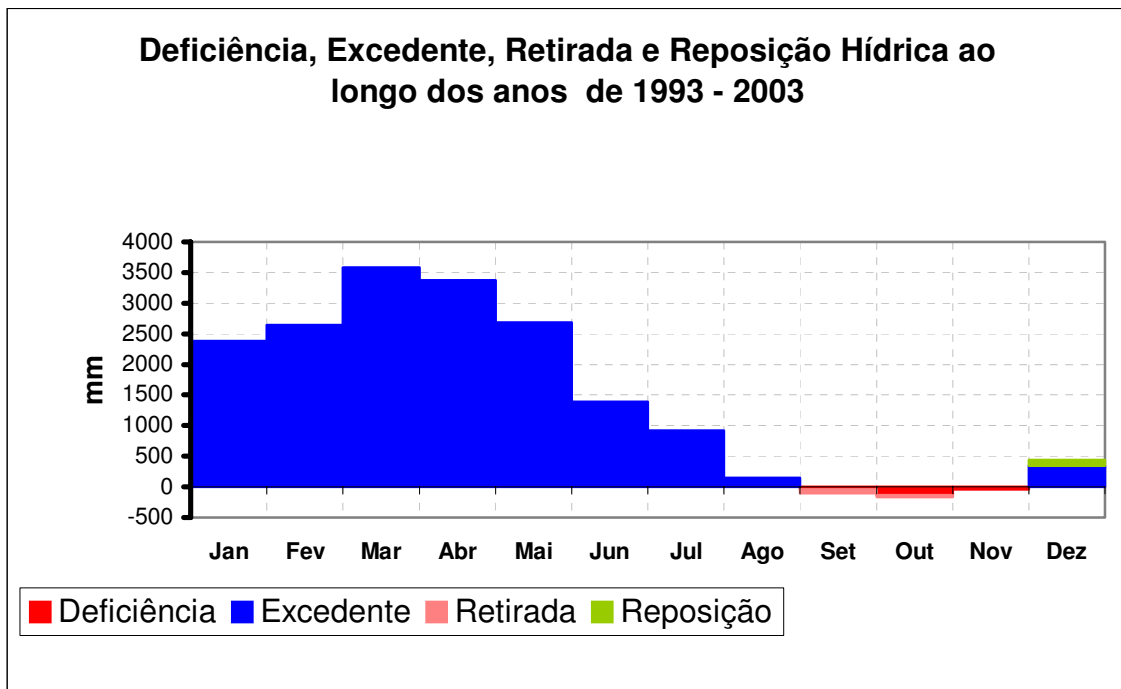


Figura 18 - Registro do comportamento do suprimento de água no solo.

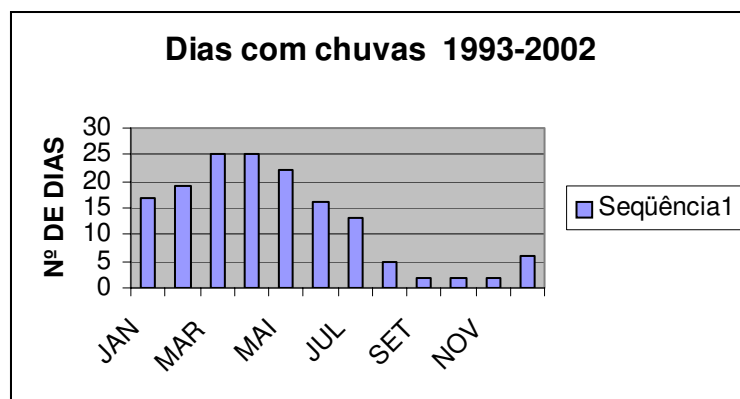


Figura 19 - Frequência mensal de dias chuvosos.

Os meses de março, abril e maio apresentam mais de 20 dias chuvosos e os meses de setembro, outubro e novembro menos de 5 dias chuvosos, (Figura 17).

Na Bacia do Bacanga, embora a estação chuvosa inicie em dezembro, somente a partir de janeiro registra-se uma quantidade suficiente para suprir as necessidades potenciais do solo que se encontra deficitário em umidade. No período de setembro, outubro e novembro, o solo está com déficit hídrico e a evapotranspiração potencial é máxima. Este período é ideal para realização dos testes de infiltração no solo.

4.4 Análise Morfométrica

A Bacia do Rio Bacanga apresenta uma área de 106 km², com perímetro de 44,8 km, padrão de drenagem dendrítico, ordenação dos canais de 4ª ordem, coeficiente de compacidade de 1,2 e fator de forma de 0,48. Conforme Villela e Mattos (1975), uma bacia com fator de forma baixa é menos sujeita à enchente e com coeficiente de compacidade próximo da unidade apresenta tendência à enchente.

Os valores obtidos para a referida bacia não se enquadram no modelo proposto por Villela e Mattos (1975), pois este foi estruturado para bacias continentais. No caso da Bacia do Rio Bacanga, esta se encontra em ambiente estuarino, sujeita à entrada periódica de maré com amplitude de até 7 metros.

4.5 Aspectos Geológicos

A Ilha do Maranhão ocupa parte setentrional do Golfão Maranhense, parte integrante da Bacia Costeira de São Luís, formada por rifteamento durante o Cretáceo (Eocretáceo-Albiano). Limita-se a norte pela plataforma continental, a sul pelos Altos Estruturais Arco Ferrer - Urbano Santos, disposto aproximadamente E-W, a leste pelo *Horst* de Rosário e a oeste pelo Arco de Tocantins.

Os mapas geológicos disponíveis da região estão na escala 1:250.000, Folha São Luís SA.23-Z-A (RODRIGUES et al., 1994) e na escala de 1:100.000 (MARANHÃO, 1998a).

A sedimentação na Bacia de São Luís iniciou-se com os sedimentos do Cretáceo da Formação Itapecuru, Formação Terciário-Paleogeno, Formação Barreiras e, finalmente, pelos sedimentos recentes da Formação Açuí. A estratigrafia é descrita conforme proposta de Rodrigues et al. (1994) para a área (Figura 20).

ERA/ PERÍODO		Unidades estratigráficas		Litologia	Potencial Mineral	
CENOZÓICO	Quaternário	Pleistoceno	FORMAÇÃO AÇUÍ	Areia fina a média, madura a submatura, com estratificação cruzada.	Areia	
				Argila arenosa, maciça bioturbada	Areia Argila	
	Terciário	Meso- -Mioceno	FORMAÇÃO BARREIRAS	Areia fina a média, com concentrações ferruginosas, imatura, intercalações argilosas caulínicas.	Argila Laterita Água Subterrânea	
Mioceno		TERCIÁRIO PALEOGENO	Areia fina a silte, com bolas de argilito, submatura, conglomerados, estratificação ondulada e cruzada.	Areia Argila Água Subterrânea		
MESOZÓICO	Cretáceo	Superior	Formação Itapecuru	Membro Alcântara	Calcilutitos, silte e areia muito fina, com argila, texturalmente imaturo, micáceo, estratificação plano-paralela	Calcário Argila
				Membro Psamítico	Arenito fino a médio, quartzo com feldspato, caulinizado, mica, nódulos ferruginizados, estratificação plano-paralela e cruzada.	Água subterrânea

Figura 20 - Coluna estratigráfica da Bacia de São Luís (adaptado de RODRIGUES et al., 1994).

4.5.1 Formação Itapecuru

As rochas da Formação Itapecuru de idade cretácica foram subdivididas em Membro Inferior Psamítico e Membro Superior Alcântara.

O Membro Inferior Psamítico compõe-se por arenitos avermelhados e esbranquiçados, finos a médios, caulínicos, com estratificação cruzada, siltitos, calcarenitos e siltitos micáceos.

O Membro Alcântara caracteriza-se por siltitos e folhelhos vermelhos, coesos, de laminação plano-paralela, intercalados com bancos tabulares a lenticulares de calcários creme-esbranquiçados. Essas rochas demarcam o último evento do Cretáceo Superior na plataforma (RODRIGUES et al., 1994).

O contato entre o Membro Psamítico e Membro Superior Alcântara ocorre através de discordância angular entre a seqüência arenosa e o pacote pelítico-carbonático. O Membro

Psamítico repousa discordantemente sobre sedimentos do Mesozóico, Paleozóico e rochas do embasamento cristalino.

As litologias que compõem a Formação Itapecuru foram afetadas por processos de laterização, tendo se desenvolvido um perfil pouco evoluído, com espessura de 3 a 4 m, caracterizando uma cobertura detrítico/laterítica ou pode ser capeada por sedimentos flúvio-lacustres holocênicos das amplas planícies de inundação.

A idade dos sedimentos psamíticos foi baseada em análises micropaleontológica e indicam como pertencente ao Albiano (COLARES e ARAUJO, 1990).

A idade do Membro Alcântara, baseada em amostras de pólenes dos folhelhos da Formação Alcântara (CUNHA, 1968 apud RODRIGUES et al., 1994) foi atribuída ao Cretáceo Superior.

A exposição dessa Formação é muito restrita. Geralmente, encontra-se nos paredões de falésias de Alcântara, com espessura de 20 m, onde se encontra sua seção-tipo. Em São Luís ocorre na falésia da Praia do Boqueirão, ao lado do Porto de Itaqui e na praia de São Francisco.

4.5.2 Terciário Paleogeno

Rodrigues et al. (1994) denominam Terciário Paleogeno os siltitos e argilitos de cores variegadas de tons róseo-avermelhados e esbranquiçados, contendo intercalações de arenitos finos e médios, predominando tons esbranquiçados e róseos. Os depósitos são poucos consolidados, extensivamente laterizados e com expressivos pacotes caulíníticos.

Os sedimentos do Terciário Paleogeno, com espessuras de 15 a 20 metros, ocorrem em extensões contínuas na porção setentrional da Ilha do Maranhão, nas falésias da ilha, e entre a Baía de Cumã e de São Marcos.

O posicionamento cronoestratigráfico permite considerá-los no Paleogeno. Esses sedimentos repousam em discordância angular sobre o Membro Alcântara da Formação Itapecuru e são recobertos, discordantemente, pelos depósitos plio-pleistocênicos da Formação Barreiras. Localmente, esse contato superior parece concordante e até transicional (RODRIGUES et al., 1994).

4.5.3 Formação Barreiras

Os sedimentos da Formação Barreiras são areno-argilosos de coloração róseo-avermelhada, siltitos maciços de cores amarela a ocre, ferruginizados e, ocasionalmente, conglomeráticos, desorganizados. Apresentam um perfil imaturo, com sedimentos inconsolidados, argilosos, com areias disseminadas, amarelados a avermelhados, com nódulos e blocos de concreções ferruginosas (RODRIGUES et al., 1994).

A Formação Barreiras aflora, predominantemente, na Ilha do Maranhão, nas falésias, colinas, encostas e topos dos tabuleiros. A espessura não excede 30 metros. Esta Formação sobrepõe-se a unidades mais antigas do Pré-Cambriano, Cretáceo e Terciário Paleogeno.

Os sedimentos da Formação Barreiras foram individualizados em três unidades de fácies: conglomerática, arenosa e pelítica, típicas de ambiente continental e que estão intensamente afetadas pelo processo de laterização. A fácies conglomerática forma o pacote que protege a atual superfície de mesas e tabuleiros.

Leite (1997) considera os sedimentos areno-argilosos no Grupo Barreiras indicando idade mesomiocena com base no zoneamento palinoestratigráfico insere-se na zona *crassoretitriletes*.

Rossetti (2005) realizou estudos para identificação do paleoambiente baseado na litologia, estruturas e relações de fácies, associado a fóssil traço, indicando um sistema transicional marinho com significantes entrada de água doce, típico de ambiente estuarino.

4.5.4 Formação Açuí

A Formação Açuí compreende sedimentos arenosos inconsolidados, argilosos não adensados e de mangue que preenchem as partes topograficamente mais baixas e pelas areias de praias e das dunas móveis da faixa litorânea atual (RODRIGUES et al., 1994). Os manguezais são típicos e extensos nessas áreas.

Os sedimentos quaternários da Formação Açuí ocorrem em ambientes fluviais a marinhos litorâneos e recobrem todas as demais unidades estratigráficas aflorantes na Bacia de São Luís.

4.6 Geologia estrutural

Os sistemas de lineamentos, a partir de fotointerpretação, indicam direção preferencial para NE-SW e NW-SE e menos frequentes nas direções NNE-SSW e WNW-ENE, nos terrenos cretácicos e terciários da Bacia de São Luís (RODRIGUES et al., 1994). Esta estruturação está marcada por alinhamentos de drenagem na Bacia do Rio Bacanga.

4.7 Geomorfologia

Os trabalhos enfocando a geomorfologia da Ilha do Maranhão estão centrados nos trabalhos de Ab'Saber (1960) e Barbosa e Pinto (1993), compilados nas publicações do projeto RADAM e no zoneamento ecológico-econômico do Maranhão (MARANHÃO, 2006).

A porção setentrional do Estado do Maranhão está inserida na zona de transição entre os domínios morfoclimáticos nordestino e da Amazônia Oriental na qual exhibe formas geomórficas complexas de terras firmes, colinas e tabuleiros.

Ab'Saber (1960) observou que o Golfão Maranhense apresenta características geológicas e fisiográficas extraordinariamente diferentes do Golfão Amazonense e do Delta Parnaíba-Longá.

O Golfão Amazonense ou Marajoara se caracteriza pela existência de um delta pleistocênico rejuvenescido e terraceado, cujas embocaduras dos grandes rios regionais deram origem a processos de afogamento formando as imensas rias. A topografia é composta por baixos níveis como: várzeas, terraços aluviais e deltáicos. Os níveis de baixos terraços, bem marcados, são encontrados em Belém e na Ilha do Marajó. Por outro lado, o Delta do Parnaíba-Longá pode ser considerado a mais perfeita região deltáica, formando vastos leques (AB'SABER, 1960).

O Golfão Maranhense constitui um conjunto de caracteres geológicos e geomorfológicos que se destaca, na paisagem da região pela presença de uma ilha colinosa de sedimentos terciários. Assemelha-se à Ilha de Itaparica, em Pernambuco, considerando-se que em ambos os casos foi a erosão fluvial pós-pleistocênica que as isolou ligeiramente dos terrenos terciários continentais sublitorâneos.

Ab'Saber (1960) propôs um modelo de evolução geomórfica para a região:

- Confins Interiores do Golfão Maranhense;
- Baixada Flúvio-Marinha de Perizes;

- Colinas Terciárias;
- Relevos Residuais que precedem os Chapadões Interiores;
- Chapadões das Regiões Centrais e Meridionais do Maranhão.

A baixada flúvio-marinha de Perizes apresenta o relevo praticamente nulo, situando-se muitos pontos no nível de maré alta favorecendo a invasão periódica das águas onde são encontrados os mangues.

As suaves colinas terciárias que se sucedem após as planuras alagadiças de Perizes constituem-se por sedimentos terciários com níveis variando de 8 a 25 m, geralmente cobertos por extensas lentes de canga lateríticas, responsáveis pela manutenção dos níveis altimétricos.

O relevo residual que precede os chapadões interiores é composto por pequeninas mesas, alternadas por uma série de morrotes cônicos isolados, esculpidos em formações terciárias. Apresentam altimetria de 110 a 700 metros e se destacam sobre o nível de cangas, referidos como monodnocks.

Os chapadões das regiões centrais e meridionais do Maranhão são formados por relevos tabuliformes, esculpidos nos sedimentos da Bacia Sedimentar Maranhão Piauí. As altitudes médias variam de 300 a 400 metros, sendo essas feições, geralmente, encontradas na parte sul, sudeste e sudoeste do Estado.

A compartimentação morfo-estrutural do relevo, proposta pelo projeto RADAM (Figura 21), conforme Barbosa e Pinto (1993), é a seguinte:

- Planaltos da bacia sedimentar Piauí-Maranhão;
- Depressão Periférica de Crateús;
- Pediplano Central do Maranhão;
- Planalto Setentrional Pará-Maranhão;
- Superfícies Sublitorâneas de Bacabal;
- Planícies Flúvio-marinha do Golfão Maranhense;
- Superfícies Sublitorânea de Barreirinhas, Litoral de Rias e Lençóis Maranhenses;
- Planalto Rebaixado da Amazônia (da zona Bragantina).

Publicação do IBGE (1993) dividiu o Brasil em domínios morfoestruturais, incluindo o território maranhense no domínio Bacias com Coberturas Sedimentares Inconsolidadas Plio-Pleistoceno, subdomínio da Bacia Sedimentar do Meio-Norte, tendo como unidades de relevo

os tabuleiros e as depressões; além dos Depósitos Sedimentares do Quaternário, classificados como superfícies litorâneas marinhas, flúvio-marinhas e/ou flúvio-lacustre.

Os Tabuleiros Costeiros, pertencentes à Formação Barreiras, cobrem extensas áreas do território paraense, passando pelo Maranhão, Sergipe até o Recôncavo Baiano, conforme estudos de Rodrigues et al. (1994), Leite (1973) e IBGE (1993).

A Ilha de São Luís está situada no centro da Planície Flúvio-Marinha do Golfão Maranhense, sendo formada por rochas e sedimentos da Formação Itapecuru e Barreiras respectivamente, e estão cobertas por uma superfície de crosta ferruginosa que acompanha o relevo. Na ilha são encontradas algumas formas de relevo características do Estado do Maranhão, pois se apresentam nas faixas de baixas altitudes (0 - 5 m), as planícies flúvio-marinhas, formadas por extensivos mangues; nos níveis de 20 a 30 metros, as suaves colinas; e nas altitudes maiores, 40 a 60 metros, tem-se a presença dos tabuleiros. A maior altitude encontrada na ilha atinge 60 metros.

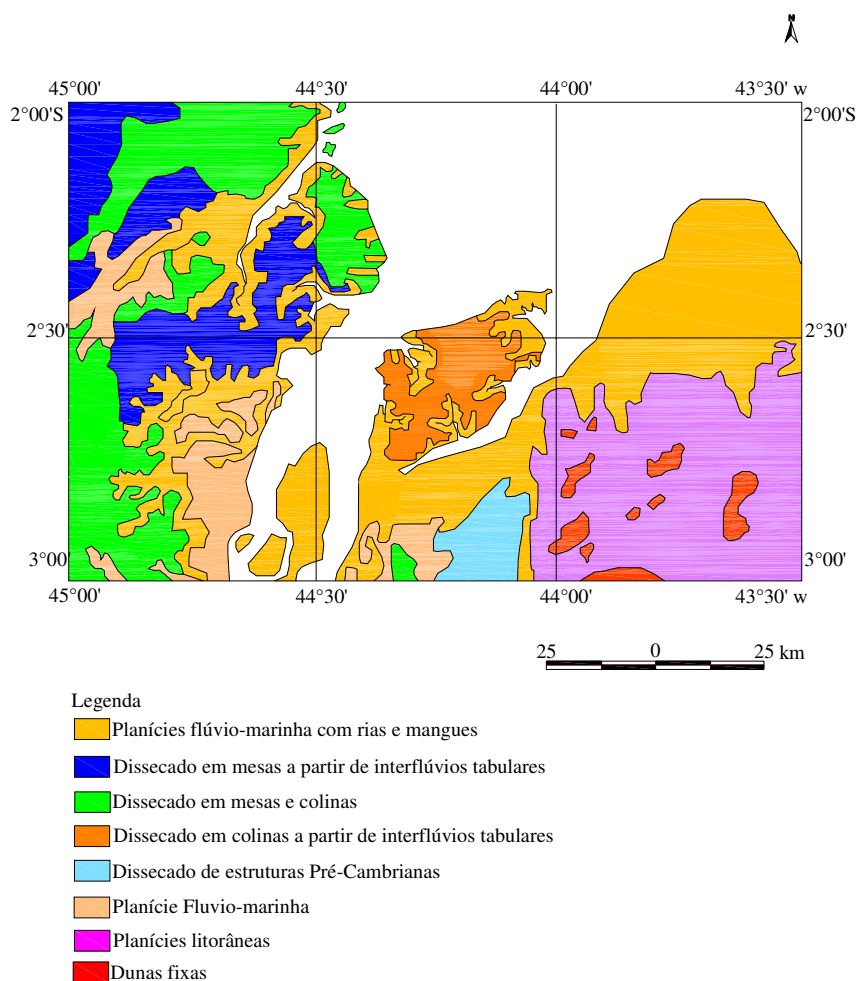


Figura 21 - Compartimentação geomorfológica do relevo maranhense (adaptado de RADAMBRASIL, 1973).

4.8 Aspectos pedológicos

Os solos típicos encontrados ao longo da área de estudo consistem em solos autóctones derivados das rochas e sedimentos do Terciário Paleogeno e da Formação Barreiras, respectivamente.

Maranhão (1998b) realizou um mapeamento pedológico que contempla a área de estudo, na escala de 1:100.000, individualizando os solos podzólico vermelho-amarelo concrecionário, gleissolos, areia quartzosa distrófica latossólica e solo indiscriminado de mangue (Figura 22).

O solo residual, típico na área da Bacia do Rio Bacanga, caracteriza-se pela alta concentração de ferro nos sedimentos areno-argilosos, argilo-arenosos, areia fina, sendo, geralmente, capeado por extensas formações de laterita (petroplintitas), cuja gênese está diretamente relacionada com as condições geológicas e do clima tropical (Figura 23).

As diferenças de solos são ocasionadas pelas condições de drenagem, transporte diferencial do material lixiviado, deslocamentos e reposição de componentes químicos móveis e acumulação dos resíduos insolúveis, alterações físico-químicas e perturbação por penetração de raízes e escavação de animais.

Os processos pedogenéticos são reações de caráter químico, físico e biológico que produzem características particulares no solo, combinadas com os fatores de formação do solo como: rocha, tempo, relevo, clima e biosfera. Informações complementares podem ser encontradas em Moniz (1975), Vieira (1988), Primavesi (1987), Bigarella; Becher e Santos (1994), Duchaufour (1982) e Fookes (1994).

As lateritas derivam de solos intensamente intemperizados, que contêm altas concentrações de sesquióxido de ferro e alumínio. Esses sais são secundariamente depositados e resultam da evaporação da água e deposição de ferro ou alumínio próximo à superfície da água subterrânea. A laterização, normalmente, acontece em solo residual, mas o solo antigo transportado também pode ser laterizado (BLIGHT, 1997).

Smith (1985) considerou que condições climáticas e ambientais influenciam na formação do material de origem, através das chuvas e drenagens. As chuvas sazonais intensas, altas temperaturas favorecem a mobilidade e acidez nas águas subterrâneas e a densa cobertura vegetal são os fatores que promovem os processos de alteração e laterização.

O solo encontrado nos tabuleiros da Bacia do Rio Bacanga é o ferralítico (Sistema Francês) equivalente aos argissolos do Sistema Brasileiro (EMBRAPA, 1999), antigamente

denominado podzólico 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.

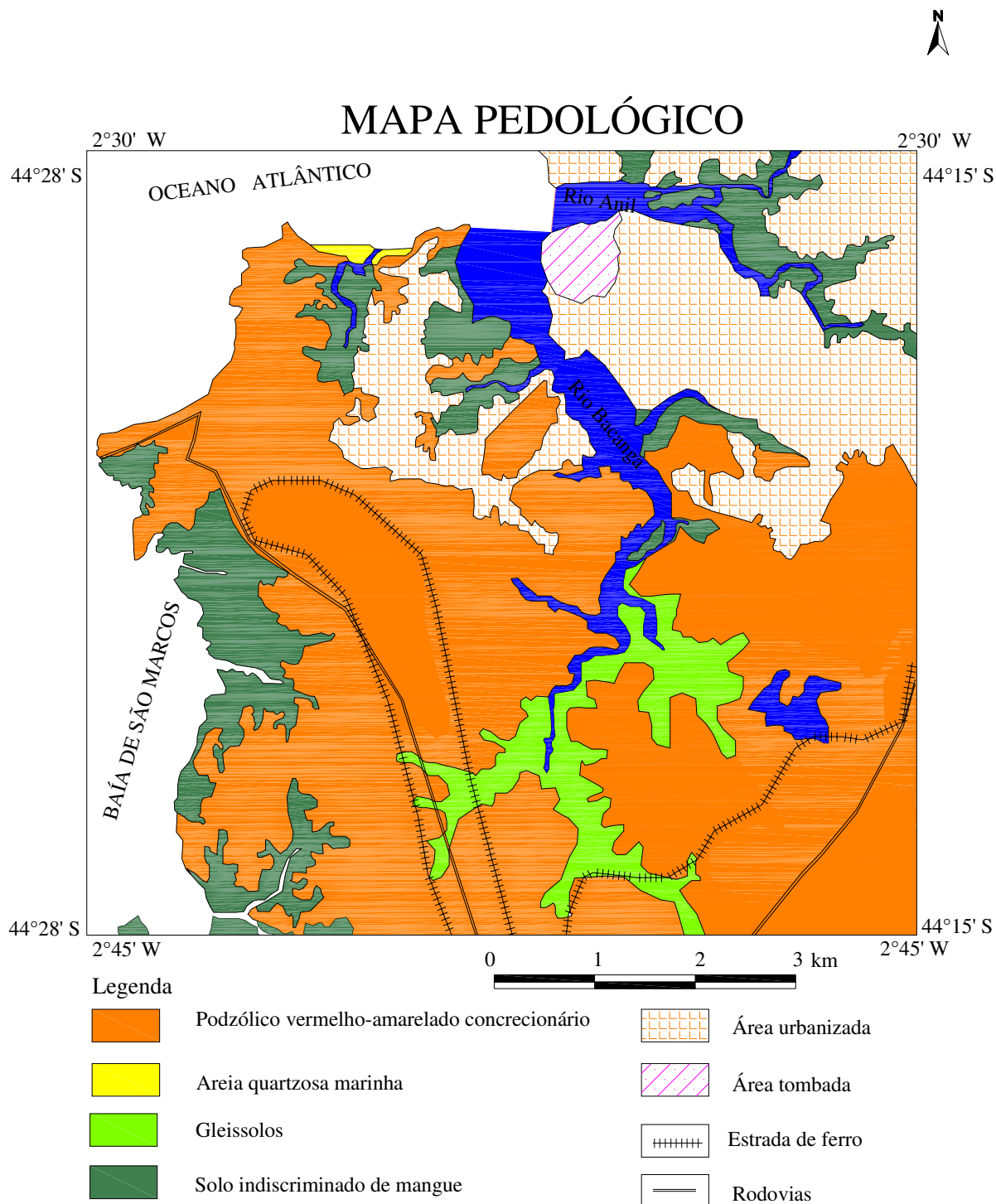


Figura 22 - Mapa pedológico da Bacia do Rio Bacanga (adaptado de MARANHÃO, 1998b).

As lateritas constituem os platôs elevados e as superfícies de peneplanizadas com altitudes entre zero e 100 metros, com camadas de mergulho sub-horizontal.

O modelo conceitual do solo para a área de estudo se desenvolve sobre os sedimentos areno-argilosos. Trata-se de um perfil imaturo, caracterizado pelos seguintes horizontes (RODRIGUES et al., 1994):

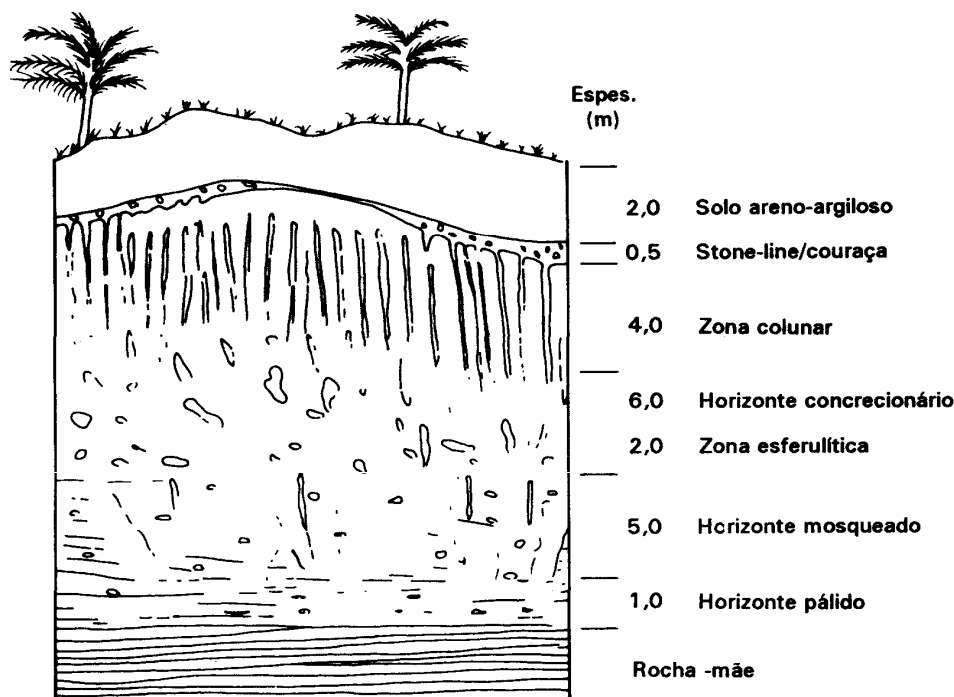


Figura 23 - Perfil laterítico imaturo característico da área de estudo (RODRIGUES et al., 1994).

Os horizontes são caracterizados do topo para a base em:

- Horizonte concrecionário ou ferruginoso (limonítico) - petroplintito apresentando estruturas concrecionárias, colunares, pisolíticas, vesiculares e cavernosas e raras estruturas reliquiares, coloração marrom-avermelhada, formando os *stone lines*.
- Horizontes mosqueados ou saprolítico – plintito com textura terrosa, estruturas reliquiares abundantes e estruturas neoformadas a vênulas e mosqueamentos.
- Horizontes pálidos caracterizados por intensa lixiviação do ferro e descoloração da rocha original intemperizada, estrutura primária abundante.
- Rocha mãe – sedimentos cretácicos e terciários.

Os processos de laterização proporcionaram a formação de depósitos de argilas caulínicas e de cascalheiras na região, utilizadas na construção civil.

4.9 Hidrogeologia

O modelo hidrogeológico da Ilha de São Luís caracteriza-se por dois aquíferos, sendo o primeiro semi-confinado, relacionado aos sedimentos cretácicos, pertencentes à Formação Itapecuru e o segundo aquífero livre, constituído pelos níveis arenosos dos sedimentos terciários Barreiras.

O aquífero livre se caracteriza por uma camada permeável parcialmente saturada de água, limitada na base por uma camada impermeável ou semi-permeável. Estando a água nele armazenada submetida unicamente a ação da pressão atmosférica (ABGE, 1981).

A disposição espacial das fácies litológicas, tanto no sentido horizontal como vertical, reflete a complexidade do comportamento hidrodinâmico dos sistemas aquíferos.

O aquífero Itapecuru é considerado como um aquífero na região (LEAL, 1977 apud RODRIGUES et al., 1994). Entretanto, a camada confinante superior tem uma seqüência cíclica de níveis de composição variável de argila e areia, permitindo a realimentação do aquífero a partir da infiltração das águas pluviais, caracterizando-o como semi-confinado. O nível de variação média de profundidade das águas (nível dinâmico e nível estático) é da ordem de 9 m e vazão específica média de 2,94 m³/h/m, verificando-se um valor máximo de 21,5 m³/h/m e mínimo de 1,4 m³/h/m (RODRIGUES et al., 1994).

O sistema semi-confinado é constituído por uma seqüência de sedimentos clásticos finos, predominantemente arenosos. Nove poços existentes na área Itaqui-Bacanga foram perfurados pela Companhia de Água e Esgoto do Maranhão - CAEMA, e indicam a profundidade do aquífero variando de 51 a 116 metros.

As características hidrodinâmicas para esse aquífero indicam uma condutividade hidráulica (K) de 1,4 x 10⁻⁵ m²/s, transmissividade (T) de 7 x 10⁻⁵ m² e armazenamento (S) de 3,5 x 10⁻² (REBOUÇAS, 1972).

Os parâmetros hidrodinâmicos do sistema aquífero foram deduzidos a partir de 31 testes de poços, dos quais 28 executados pela CAEMA e 3 pela ACQUA-PLAN. Esses últimos poços foram monitorados, sendo possível avaliar os efeitos e quantificar a taxa de recarga por infiltração vertical das camadas, a qual indicou 580 mm/dia/km² ou 0,58 litros/dia/m². Entende-se por recarga o volume de água que efetivamente penetra no aquífero, seja a partir das precipitações pluviométricas, da transferência de outros aquíferos, das águas superficiais que irá compro as reservas de água subterrânea (ABGE, 1981).

O aquífero livre Barreiras tem uma espessura variável de 15 a 38 metros, constituído por areia de granulometria fina a média, com intercalações de silte e argila. Os níveis arenosos não são espessos, implicando no rápido trânsito das águas subterrâneas, que logo infiltram para o aquífero semi-confinado ou surgem em áreas de descarga ao longo das encostas, nos grotões da região (COSTA, 2003).

O nível da água dos poços situados nas proximidades do oceano apresenta flutuações sob influência do vai e vem das marés, diminuindo à medida que se dirige para o interior do continente.

O modelamento matemático realizado para o aquífero costeiro na área da Ponta da Madeira para avaliar a possibilidade de atender a demanda de água de 94,5 l/s necessária para ser utilizada na Planta de Pelotização da CVRD, indicou que o aquífero apresenta intrusões marinhas, afetando a zona de mistura e alguns das captações dos poços presentes na área (F. JUNIOR et al., 2003).

V APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS

5.1 Etapa Geral – Mapa geológico-geotécnico 1:20.000

O mapa geológico-geotécnico elaborado na etapa geral integra as informações geológicas, geomorfológicas e de solos em um na escala de 1:20.000, utilizando-se como ferramenta principal uma fotointerpretação detalhada associada ao controle de campo. O levantamento de campo contou com a descrição de 160 pontos estudados, 29 descrições de poços escavados, 17 poços cacimbas e 14 ensaios com Permeâmetro de Guelph, atingindo-se uma média de, aproximadamente, 2 pontos/km² (Apêndices A e B).

Os produtos da etapa geral são apresentados os seguintes documentos cartográficos: mapa de pontos (Apêndice A) e mapa geológico-geotécnico (Apêndice B).

Como suporte para a definição das unidades e sub-unidades, e para o entendimento do posicionamento espacial das unidades, foram desenhadas em forma de perfil esquemático algumas características gerais da Bacia do Rio Bacanga, tais como: perfil do relevo, extensão lateral e amplitudes, altitudes médias, de modo que possam ser visualizadas comparativamente. O perfil esquemático representa o modelo geológico-geomorfológico da área estudada (Figuras 24). O modelo numérico do terreno (MNT), representação em 3D, ressalta as formas do relevo característico da área estudada como tabuleiros, colinas, planície flúvio-marinha e planície fluvial (Figura 25).

5.1.1 Descrição das unidades geológico-geotécnicas – Etapa Geral (esc: 1:20.000)

As unidades geológicas-geotécnicas foram definidas com base nas observações e integrações das características das unidades geológicas e geomorfológicas, das feições e elementos de relevo e dos tipos de solo da área, extraídos de Rodrigues et al. (1994), Radambrasil (1993), Maranhão (1998b), respectivamente, com adaptações a partir das informações de campo. A área insere-se na divisão geomorfológica pertencente ao Golfão Maranhense caracterizada por relevos dissecados em colinas a partir dos tabuleiros e planícies flúvio-marinha.

Os critérios utilizados na individualização e delimitação das unidades geológico-geotécnicas se basearam em Cooke e Doornkamp (1990), Lollo e Zuquette (1996), Zaine



Figura 26 - Modelo Numérico do terreno (MNT) da Bacia Hidrográfica do Rio Bacanga.

(2000). Destaca-se a importância dos trabalhos de fotointerpretação para definição e delimitação das unidades geológica-geotécnica mapeadas nesse estudo.

5.1.1.1 Unidade I - Depósitos construídos

Esta unidade corresponde a uma área de mangue pertencente à planície flúvio-marinha, com altitudes variando de 0 a 5 metros, sujeitas a entradas de marés, e que foi aterrada com materiais de empréstimo para construção de rodovias e bairros. Tem sua ocorrência na porção norte ao longo da margem esquerda do Rio Bacanga, onde ocorreu a intensificação da urbanização, principalmente, próximo da orla marinha.

A alteração promovida no ambiente flúvio-marinho provocou severas modificações na dinâmica da água na bacia, considerando os aterramentos, impermeabilizações e inundações frequentes, como na Av. Presidente Médici, Av. dos Africanos e no Bairro da Areinha. Desta forma, esta área, com as características naturais modificadas, foi considerada uma unidade geológico-geotécnica cronologicamente relacionada ao Tecnógeno.

Nos meses de março e abril, quando as chuvas são mais intensas, os processos de alagamentos e inundações causam severos transtornos ao tráfego de veículos e transeuntes (Foto 2).

5.1.1.2 UNIDADE II – Áreas planas de fundo de vales - Formação Açuí

Compreende uma área extensa e plana pertencente à planície flúvio-marinha e fluvial, com altitudes variando de 0 a 5 metros. Trata-se de um ambiente estuarino, rico em biodiversidade, tendo sua ocorrência ao longo do Rio Bacanga. Caracteriza-se por uma zona de acumulação de sedimentos argilosos e arenosos pertencentes à Formação Açuí.

A unidade II foi sub-dividida em sub-unidade II – A (mangues) e sub-unidade II – B (Planície fluvial).



Foto 2 – Vista geral da unidade I, com detalhe de alagamento na Av. dos Africanos, após chuva intensa (Ponto G-160, Apêndice A).

5.1.1.2.1 Unidades II – A - Mangues

A sub-unidade II – A foi definida como a porção de mangue existente na planície flúvio-marinha com altitudes menores que 5 metros, constituída por sedimentos lodosos, ricos em matéria orgânicas e nutrientes, mal drenados, pertencentes à Formação Açuí (RODRIGUES et al., 1994). Os solos presentes são indiscriminados de mangue (MARANHÃO, 1998a).

A modificação do regime de maré com a construção da Barragem do Bacanga em 1979, alterou significativamente, o manguezal. O lançamento de esgoto doméstico oriundo dos bairros adjacentes afetou a quantidade e qualidade da água do sistema receptor provocando redução do oxigênio dissolvido (eutrofização), aumento de turbidez, alteração do ph, com reflexos sobre a manutenção das condições ideais de sobrevivência dos organismos e para a saúde humana.

Essas áreas estão intensamente urbanizadas e comprometidas pela impermeabilização, como exemplo, o Rio das Bicas. O esgoto doméstico produzido é lançado *in natura* para a área da barragem, que constitui um esgoto a céu aberto, de onde centenas de pessoas retiram seu sustento com a pesca e coleta de caranguejos, sururus e outros, altamente contaminados.

Na área de estudo ocorrem cones de dejeção ao longo do Rio Bacanga, identificados a partir da análise de fotointerpretação. Observou-se a formação de três cones presentes nos afluentes pela margem esquerda, provavelmente ligados à Implantação do Terminal de Minério da Companhia Vale do Rio Doce – CVRD, que causou alterações no relevo da área e três cones menores ao longo dos Igarapés Coelho e Tapete, provavelmente, relacionados à intensa urbanização e aos processos erosionais reinantes na área.

Os resultados das análises das amostras de água indicaram valores elevados nas amostras da zona inferior do estuário, notadamente no Rio das Bicas e áreas próximas à Vala da Macaúba e Sá Viana, onde as contribuições de esgoto doméstico e lixo de parte do Centro Histórico de São Luís e de vários bairros periféricos são mais acentuadas, indicando índices de 160.000 colís/100ml, para o período compreendido entre maio de 1997 e agosto de 1998 (LABOHIDRO, 1999).

A área apresenta uma rica biodiversidade (Foto 3) associada ao manguezal, porém, sofre com os problemas ambientais oriundos da intensa urbanização tais como: assoreamento, inundação, urbanização do mangue (aterramento), lançamento de lixo, desmatamentos, queimadas, contaminação das águas por esgoto lançado *in natura* e eutrofização das águas da Barragem do Bacanga.



Foto 3 – Vista parcial do manguezal na Barragem do Bacanga (Ponto – G -143, Apêndice A).

São registradas, com frequência nos jornais locais, notícias de alerta para os impactos ambientais registrados na bacia, além artigos e monografias escritos por pesquisadores da Universidade Federal do Maranhão como *Rio Bacanga agoniza; Poluição compromete o Rio Bacanga*, (LABOHIDRO, 1999, Foto 4), *Desmatamento ameaça o Batatã* (DESMATAMENTO, 2000, ANEXO A).



Foto 4 - Trecho do Rio das Bicas intensamente assoreado, (Ponto G – 150, Apêndice A).

5.1.1.2.2 Sub-unidade II – B – Planície Aluvionares

Os depósitos aluvionares, pertencentes à Formação Açuí, ocorrem nas áreas de várzeas dos rios, com altitudes de 0 a 5 metros, onde predomina água doce. São representados por sedimentos arenosos a argilosos, esbranquiçados, com seixos e grânulos dispersos de lateritas, mal selecionados, com espessura inferior a 5 metros. Os solos são classificados como hidromórficos e orgânicos, (Fotos 5 e 6).



Foto 5 – Vista parcial da planície aluvionar do Rio da Prata (Ponto G-50, Apêndice A).



Foto 6 – Vista parcial das palmáceas, vegetação característica das áreas úmidas do Rio Maracanã (Ponto G- 87, Apêndice A).

Os principais problemas ambientais que ocorrem nesta unidade são representados pela freqüente pressão para ocupação das áreas, principalmente para construção de casas, rodovias e desmatamento.

5.1.1.3 UNIDADE III – Terrenos associados a fácies arenosas da Formação Barreiras

Esta unidade corresponde à área mais elevada da bacia, com altitudes de 30 a 60 metros, representando os tabuleiros. Tem sua ocorrência na porção SSE da bacia, formada por sedimentos arenosos da Formação Barreiras. Apresenta uma ampla abrangência local nas áreas Recanto Verde, Vila Itamar, Maracanã e Vila Nova República e regional. Os solos presentes são os argissolos e neossolos.

A unidade III foi sub-dividida em sub-unidade III – A (tabuleiros) e sub-unidade III - B (vertentes).

5.1.1.3.1 Sub-unidade III – A – Fácies arenosa de Formação Barreiras em topo de tabuleiro

Esta unidade representa os altos topográficos, com altitudes que variam de 45 a 60 metros, pertencente à Formação Barreiras (RODRIGUES et al., 1994). 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 (Foto 7). Apresenta intercalações de concreções lateríticas.

As sub-unidades III – A e B apresentam, geralmente, solos profundos, em média com 1 a 2 metros, caracterizados por argissolos e às vezes, neossolos. A profundidade do N.E é variável, entre 7 e 21 metros, com oscilações durante o período de estiagem.

Os problemas registrados na área para a unidade III 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.



Foto 7 - Vista parcial do topo do tabuleiro da unidade III - A (PONTO – I - 7, Apêndice C).

5.1.1.3.2 – Sub-unidade III – B – Fácies arenosa da Formação Barreiras em situação de meia encosta

A sub-unidade III - B está representada nas encostas e é constituída por sedimentos arenosos, amarelados a avermelhados, ricos em concreções lateríticas envolvidas em uma matriz arenosa a argilosa, com declividade variando de moderadamente inclinado (5 - 15%) a íngreme (> 15%, Fotos 8 e 9).

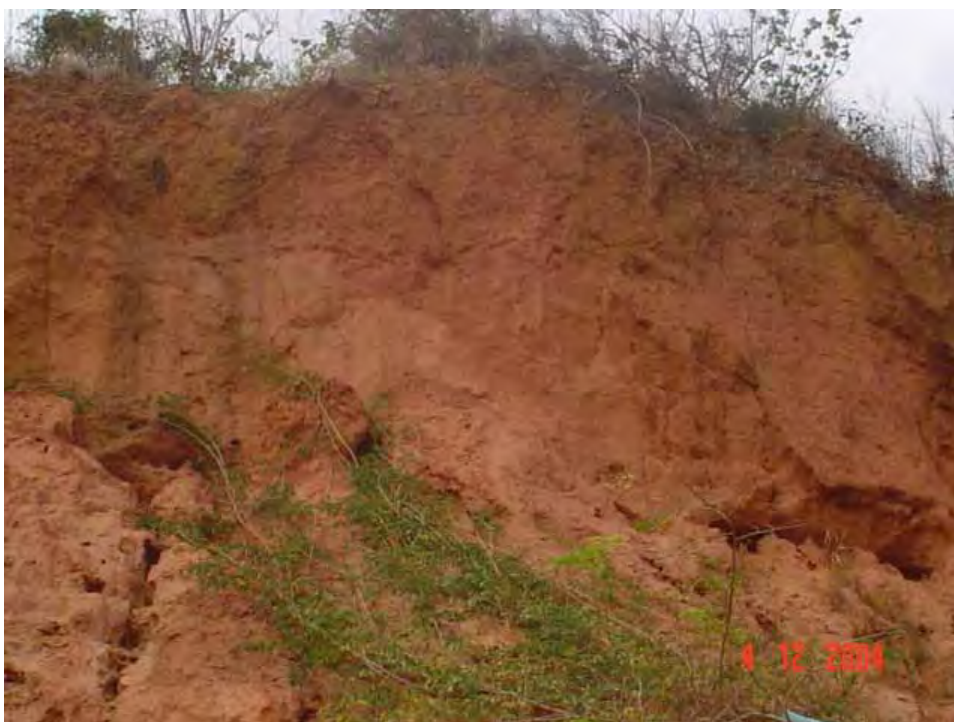


Foto 8 - Concreções lateríticas que sustentam o tabuleiro da unidade III - B (Ponto - G - 81, Apêndice A).



Foto 9 – Registro de retirada de lateritas da sub-unidade III - B, na área da Bacia do Rio Bacanga (Ponto - G - 74, Apêndice A).

5.1.1.4 Unidade IV – Fácies areno-argilosa da Formação Barreiras

A unidade IV foi definida, principalmente, na área oeste da bacia, com altitudes de 20 a 30 metros, demarcada pela quebra positiva na análise de fotointerpretação, presente no topo e meia encosta das colinas. Apresenta grande abrangência na área, com registro nos Bairros do Gapara, Anjo da Guarda e Vila Embratel e em nível regional.

A unidade IV foi sub-dividida em sub-unidade IV - A (topo de colina) e sub-unidade IV - B (vertentes).

5.1.1.4.1 Sub-unidade IV – A - Área de ocorrência da fácies areno-argilosa da Formação Barreiras em topo de colina

Trata-se de sedimentos de coloração avermelhada a amarelada, compostos de areia fina a argila, com plaquetas de folhelhos dispersos, macroporos; consistência média a baixa; intensamente laterizados, pertencentes à Formação Barreiras. Os topos das colinas apresentam declividades branda (2 - 5%) a inclinada (5 - 15 %), Fotos 10 e 11).



Foto 10 - Vista parcial do topo da colina da sub-unidade IV - A (Ponto G - 31, Apêndice A).



A). Foto 11 – Vista de detalhe dos sedimentos areno-argilosos da sub-unidade IV - A (Ponto G - 31, Apêndice

5.1.1.4.2 Sub-unidade IV – B - Área de ocorrência da Fácies areno-argilosa da Formação Barreiras em meia encosta da colina

A sub-unidade IV- B compreende os sedimentos areno-argilosos, amarelados a avermelhados, intensamente mosqueados e laterizados (Foto 12). As encostas apresentam-se moderadamente inclinadas, podendo, em áreas mais restritas junto ao fundo de vales, mostrar ângulos mais íngremes. Registra-se a presença de voçorocas nesta unidade.

Os solos presentes na área são os argissolos e neossolos de espessura variável. A profundidade do N.E. é variável podendo alcançar profundidade da ordem de 20 a 48 metros para o aquífero livre Barreiras, a partir de dados de poços profundos.



Foto 12 - Sedimentos areno-argilosos intensamente mosqueados da sub-unidade IV - B (Ponto G - 23, Apêndice A).

Os principais problemas registrados nesta unidade abordam os conflitos do uso do solo. Apresenta alta suscetibilidade à erosão (ravinas e voçorocas) e escorregamentos, provocando, por vezes, perdas materiais, com maior incidência durante o período chuvoso na região.

5.1.1.5 Unidade V – Área de domínio da Formação Terciário Paleogeno.

A unidade V tem sua ocorrência na porção norte da área e nas colinas com altitudes de 5 a 20 metros, dispostas ao longo das margens do Rio Bacanga. É demarcada por uma forte quebra positiva na análise de fotointerpretação. Apresenta grande abrangência nos Bairros de Vila Nova, Vila Mauro Fecury 2, Sá Viana, Filipinho, Sacavém, Coroadado e Coroadinho e no contexto regional extrapola os limites da área de estudo. Corresponde ao domínio de abrangência da Formação Terciário Paleogeno (RODRIGUES at al., 1994).

A unidade V foi sub-dividida em sub-unidade V – A (topo de colina) e sub-unidade V - B (vertentes).

5.1.1.5.1 – Sub-unidade V - A - Área de ocorrência da Formação Terciário Paleogeno em topo de colinas com altitudes de 5 a 20 metros

Esta sub-unidade ocorre no topo das colinas com altitudes variando de 5 a 20 metros, formando colinas de topo aplainados (0 - 2%) e brando (2 - 5%).

É representada por rochas de coloração rósea a vermelha, com intercalação de siltitos e arenitos finos com argilitos, em escala centimétrica a decimétrica, por vezes, forma lentes de caulinita com espessura de até 1 m na base do afloramento (Fotos 13 e 14). No baixo curso do Rio Bacanga registra-se a ocorrência de anfiteatro de nascentes de drenagem, indicando uma baixa permeabilidade das rochas.



Foto 13 - Lentes de caulinita na base do afloramento (Ponto G - 144, Apêndice A) da sub-unidade V - A.



Foto 14 - Vista de detalhe dos argilitos arroxeados intensamente mosqueados da sub-unidades V - A (Ponto G - 137, Apêndice A).

5.1.1.5.2 – Sub-unidade V – B - Área de ocorrência da Formação Terciário Paleogeno em situação de média e baixa encosta.

A sub-unidade V - B compreende as encostas com declividade variando de moderadamente inclinado (5 - 15 %) a íngreme (>15 %), principalmente junto ao fundo de vale próximo ao mangue. Os solos presentes na unidade V, geralmente, são argissolos e neossolos. O nível freático é variável, observado em poços tipo tubular e escavado, com profundidade de 3 a 40 m, variando nos períodos de estiagem.

Os principais problemas registrados nas sub-unidades V - A e V - B referem-se a processos erosivos por ravinamentos, deslizamentos e inundação, às vezes chegando a causar danos materiais, principalmente durante o período chuvoso. Os bairros do Sacavém e Coroadinho, localizados nas áreas de várzea do Rio das Bicas e adjacências, sofrem graves impactos ambientais como *Fortes chuvas causam inundações e desabamento em toda São Luís;*, *Periferia tem problemas com chuvas fortes;* *Chuvas aumentam os problemas em bairros* (FORTES CHUVAS, 1994; PERIFERIA, 1994, CHUVAS AUMENTAM, 1994, ANEXO B).

5.1.1.6 Unidade VI – Domínio da Formação Itapecuru

Esta unidade compreende as rochas da Formação Itapecuru (RODRIGUES et al., 1994) encontradas na porção norte da área estudada, próximo à Barragem do Bacanga. Caracteriza-se por arenitos finos e argilosos, avermelhados com manchas esbranquiçadas, homogêneos, com estratificação plano-paralela e cruzada, de baixo ângulo, e com estruturas convolutas (Foto 15 e Foto 16a).

Ocorre nas áreas mais baixas da bacia, com altitudes menores que 5 metros, freqüentemente, formando a base das falésias do Bonfim e na planície flúvio-marinha, com espessura de até 2 metros, com declividade moderadamente inclinada (5 - 15 %) a íngreme (>15 %). Aflora em corte de estrada próxima ao Porto do Itaqui, distante da área de estudo, aproximadamente, 3 km. Conforme dados de poços profundos, esta unidade é identificada a partir de 60 metros de profundidade em diante na área estudada e apresenta grande abrangência em nível regional.



Foto 15 - Detalhe das manchas esbranquiçadas nas rochas da unidade VI, na base da falésia do Bomfim (Ponto G - 3, Apêndice A).

O solo residual formado por essa unidade são os argissolos. As rochas apresentam alta suscetibilidade à erosão quando submetidas ao forte intemperismo (Foto 16 b).



FOTO 16 a - Vista em detalhe da estratificação cruzada da rochas da unidade VI da Formação Itapecuru.



Foto 16 b - Vista parcial dos sulcos na unidade VI da Formação Itapecuru (Ponto G - 139, Apêndice A).

5.2 Etapa de Semi-Detalhe (2ª etapa) – 1:10.000

O método do detalhamento progressivo propõe para a segunda etapa a elaboração de cartogramas em uma escala maior, selecionadas a partir de um contexto geral que expresse um interesse específico para o planejamento e gestão do uso do solo. Para esta etapa, foi selecionada a área do Reservatório Batatã, situado na bacia do Rio Batatã. A escolha justificase por se tratar de uma área de relevância para preservação dos mananciais na ilha oceânica.

A área apresenta superfície de 6,6 km², que corresponde à Bacia do Rio Batatã, afluente do médio curso do Rio Bacanga (Figura 26). A área está inserida no centro do Golfão Maranhense, caracterizada pela dissecação em colinas a partir dos tabuleiros. Em escala de detalhe, são encontrados tabuleiros, colinas com encostas côncavo-convexas e, por vezes, retilíneas, principalmente a montante do Rio Batatã (Figura 27). As unidades geológicas que ocorrem na área caracterizam-se por sedimentos e rochas da Formação Barreiras e do Terciário Paleogeno, respectivamente.

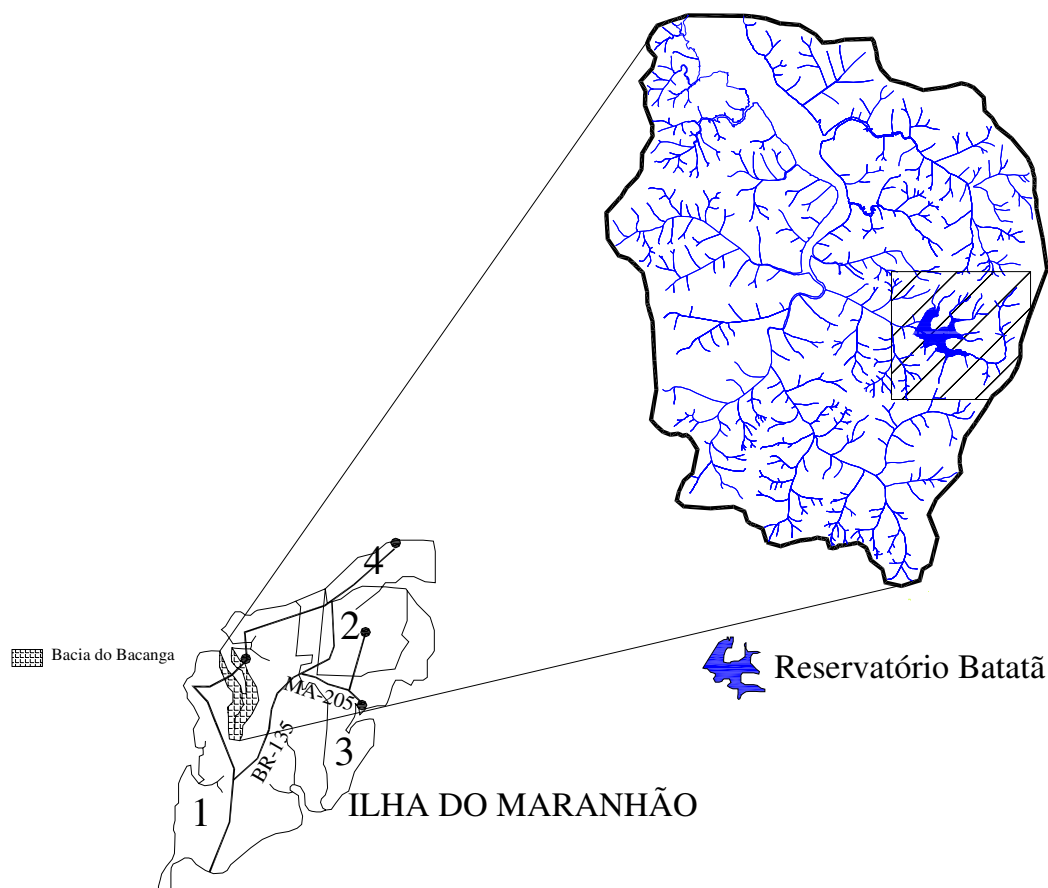


Figura 26 – Mapa de situação da área de semi-detalhe junto ao Reservatório Batatã na Bacia do Rio Bacanga.

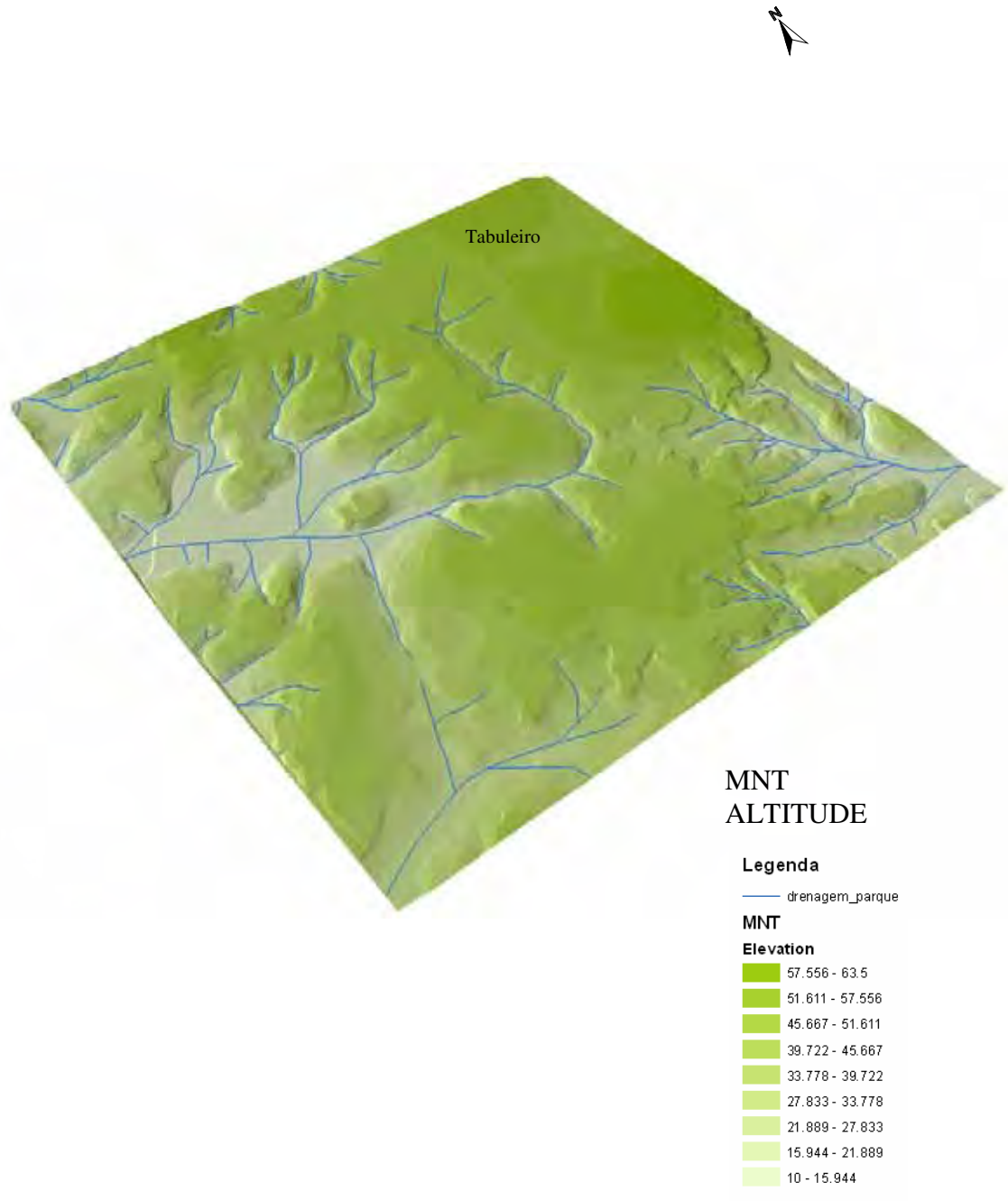


Figura 27 – Representação do modelo numérico do terreno (3D) da área de semi-detalle do Reservatório Batatã.

O detalhamento das características do meio físico foi realizado com a quantificação de alguns parâmetros como: declividade, determinação das profundidades do N.A e das direções

das linhas de fluxo das águas subterrâneas, levantamentos das características dos materiais inconsolidados e delimitação das zonas de uso e ocupação do solo. As análises laboratoriais incluíram: granulometria conjunta, massa específica dos sólidos, índice de liquidez, índice de plasticidade, capacidade de troca catiônica, índices físicos do solo e ensaios *in situ* com o infiltrômetro para auxiliar nas delimitações das unidades de material inconsolidado. Os pontos estudados e analisados encontram-se no Apêndice C.

Nesta etapa de trabalho foram elaboradas as seguintes cartas na escala de 1:10:000:

- Carta de declividade - Apêndice D
- Carta de profundidade do nível de água subterrâneo - Apêndice E
- Carta da superfície potenciométrica do aquífero livre Barreiras - Figura 28
- Carta de cobertura de materiais inconsolidado - Apêndice F
- Carta de uso e ocupação do solo - Apêndice G

5.2.1 Carta de Declividade

A Carta de Declividade foi elaborada partindo das seguintes premissas:

a) o tempo de contato da água com a superfície do terreno influi, significativamente, no volume de água infiltrada;

b) áreas com alta declividade favorecem o escoamento superficial e em contraposição áreas com baixos valores de declividade permitem uma maior infiltração de água no solo.

Outro fator de destaque é sua utilização como um dos mais importantes parâmetros para individualização das unidades geológico-geotécnicas.

Foram adotadas as seguintes classes de declividade, adaptado de Demeck (1972 apud MOREIRA e PIRES NETO, 1998):

- 0 - 2% - plano
- 2 - 5% - brando
- 5 - 15% - moderado
- > 15 % - íngreme

Na área foram identificadas três formas de relevo: tabuleiros com altitudes de 60 a 40 metros, colinas entre 20 e 35 metros e planícies aluviais com cotas inferiores a 10 metros.

Os tabuleiros apresentam topo predominantemente plano, porções com declividade branda e encostas com declividade branda a íngreme. Em torno do reservatório, há predomínio de declividade moderada a íngreme.

O Reservatório Batatã foi estrategicamente construído na cota de, aproximadamente, 15 metros, na base da encosta do tabuleiro, o que propicia uma alta concentração de água de escoamento superficial durante os eventos chuvosos de alta intensidade e baixa duração.

As colinas representam as porções do tabuleiro que sofreram dissecação no decorrer do tempo geológico e ainda preservam seu topo relativamente aplainado com encostas brandas a íngremes, situadas na porção oeste do reservatório.

A planície fluvial é representada por áreas planas e baixas, cujos depósitos aluvionares são provenientes dos materiais lixiviados do tabuleiro.

A análise desse cartograma permitiu correlacionar as áreas de menor e maior declividade, as áreas com características geotécnicas suscetíveis à infiltração, um dos parâmetros utilizados na análise da vulnerabilidade.

5.2.2. Carta de profundidade do nível de água subterrâneo e da superfície potenciométrica do aquífero livre

A elaboração dessas cartas representam a necessidade básica em termos de instrumentos hidrogeológicos e tem a finalidade de delimitar e individualizar as áreas de recarga e descarga local, com a definição das principais frentes de escoamento superficial e sub-superficial. A carta de profundidade do nível de água subterrâneo foi elaborada a partir da profundidade do nível freático até a superfície, onde se localiza a abertura do poço, denominada de nível estático (N.E.), isto é, o nível em que se encontra a água de um poço em repouso. A carta de superfície potenciométrica do aquífero livre Barreiras foi elaborada considerando-se a cota do nível da água (N.A.) em relação ao nível do mar através da seguinte relação matemática (FETTER, 2001).

$$NA = Cota - NE$$

Dados:

N.A. = cota do nível da água;

Cota = altitude do poço;

NE = nível estático.

A elaboração das cartas foi feita com base em mapa topográfico, observações de campo, dados de poços tubular e tipo escavado de propriedade da CAEMA e particulares, respectivamente. Os dados de N.E. e N.A. foram plotados e interpolados manualmente, gerando a Carta de profundidade do nível de água subterrâneo e da superfície potenciométrica do aquífero livre Barreiras.

A elaboração da Carta de profundidade do nível de água subterrânea permitiu definir linhas com diferentes profundidades do nível estático, sendo gerada as linhas de profundidade de 1, 5, 10, 15 e 20 metros (Apêndice E).

Foram utilizados uma bateria de 11 poços, sendo 06 tubulares e 09 escavados medidos em período chuvoso na região. Os poços escavados foram perfurados depois da construção do Reservatório Batatã em 1964 (Tabela 11, Figura 28).

Tabela 11 - Dados sobre poços tubulares e escavados da área do Reservatório Batatã.

Nº DO POÇO	LOCAL	PONTOS MAPA	DATA	PROPRIETÁRIO	TIPO DE POÇO	Z	N.E	N.A	PROF. (m)	VAZÃO m³/h
P - 1	Parque Bacanga	581198/9714359	25.01.73	Caema	Tubular	26	27	- 1	132	18
P - 2	Refesa	584213/9714018	-	Particular	Tubular	54	21	33	70	5,9
P - 3	Oleama	584600/9711000	JUN/83	Particular	Tubular	10	28	10	100	11,8
P - 4	Vila Esperança	581815/9711465	20/03/03	Particular	Escavado	33	7	26	-	-
P - 5	Vila Esperança	581729/9711402	20/03/03	Particular	Escavado	30	8	22	-	-
P - 6	Vila Esperança	582428/9710870	20/03/03	Particular	Escavado	34	8	26	-	-
P - 7	Vila Esperança	582035/9710735	20/03/03	Particular	Escavado	27	2	25	-	-
P - 8	Vila Esperança	582369/9710644	20/03/03	Particular	Escavado	31	3	28	-	-
P - 9	Brejo	581055/9710500	20/03/03	Particular	Escavado	26	0,0	26	-	-
P - 10	Reservatório Batatã	581924/9711905	20/03/03	Particular	Escavado	25	2	23	-	-
P - 11	Recanto Verde	583369/9713819	20/03/05	Particular	Escavado	50	7	43	-	-
P - 12	Vila Esperança	582196/9710862	20/03/03	Particular	Escavado	33	10	23	-	-
P- 22	Parque Bacanga	580844/9715220	-	Caema	Tubular	15	8	7	94	94
P- 23	Parque Bacanga	581294/9715245	-	Caema	Tubular	15	15	0	128	28
P- 24	Parque Bacanga	581732/9715235	-	Caema	Tubular	18	20	-2	126	36

Z = Altitude N.E = Nível Estático N.A = Nível da água Prof. = Profundidade

FIGURA 28 - Carta da superfície potenciométrica do aquífero livre Barreiras

A Carta de Superfície Potenciométrica do Aquífero Livre Barreiras indica as direções preferenciais do fluxo de água subterrânea com a representação em planta da direção de tendência média do fluxo principal.

Este cartograma evidenciou que a superfície do tabuleiro representa a área de recarga do aquífero livre, suscetível à infiltração de água e de outros efluentes líquidos, e a área de descarga na área situa-se no reservatório.

A chuva é o principal alimentador das águas do reservatório, com média anual de 1.857 mm, conforme dados da série temporal dos dados climatológicos do período de 1993 a 2003, da Estação Meteorológica Cunha Machado - Tirirical.

No período seco, que se estende de agosto a dezembro, as reservas de água do reservatório baixam drasticamente, chegando a comprometer o abastecimento de água das áreas do Centro Histórico de São Luís e adjacências. A Companhia de Água e Esgoto do Estado do Maranhão (CAEMA) faz racionamento de água por meio de um sistema de rodízio, com dias alternados de fornecimento para os bairros atendidos (ANEXOS C e D). Nota-se que o reservatório não seca por completo, o que sugere uma contribuição dos tributários e da água subterrânea (RESERVATÓRIO BATATÃ, 2003; CAEMA, 2003; MOUCHEREK e AROUCHE, 2005).

Os dados diários de chuva analisados para o período de 02/2003 a 09/2004, com precisão de 5 em 5 minutos, indicam 3 grupos de chuvas (**A**, **B** e **C**) característica na área com duração: 5 a 15 minutos (**A**); 20 - 40 min (**B**) e acima de 45 minutos (**C**), conforme indicado na *análise cluster* pelo método de Ward (Figura 29). Os grupos de chuvas **A** e **B** representam as chuvas mais comum na área, caracterizadas por baixa intensidade e curta duração (Tabela 12).

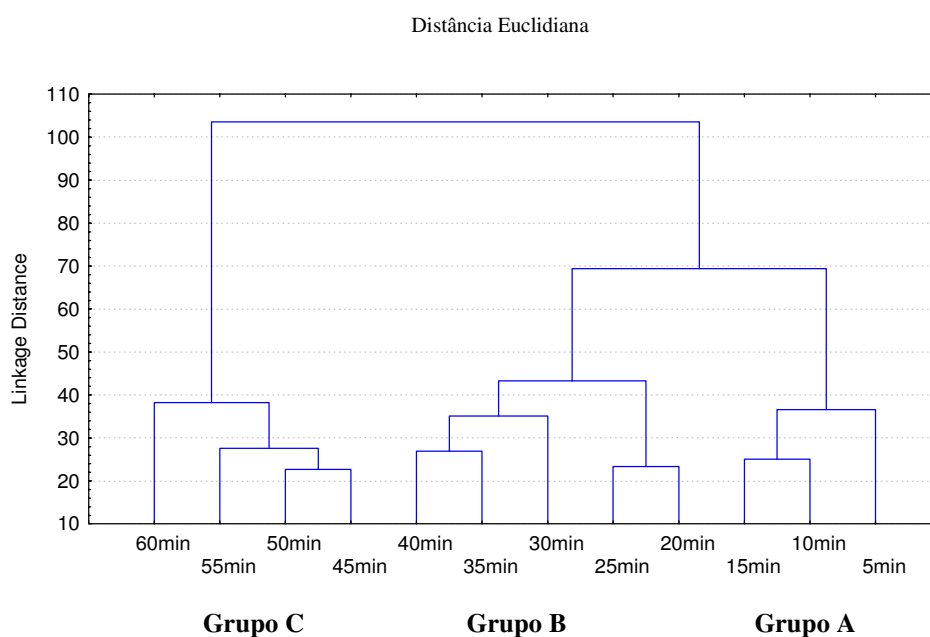


Figura 29 - Análise de agrupamento entre as durações de chuva.

Tabela 12 - Intensidade e duração de chuvas – Estação Tirirical.

MESES	2003		2004	
	INTENSIDADE MÁXIMA (mm)	DURAÇÃO (Min)	INTENSIDADE MÁXIMA (mm)	DURAÇÃO (Min)
Janeiro	-	-	36,3	150
Fevereiro	105,5	275	13,2	15
Março	25,5	15	23	50
Abril	29,4	15	39,6	280
Maiο	15,6	30	19,2	30
Junho	20	30	20,8	25
Julho	8,0	35	22,3	75
Agosto	7,2	10	-	-
Setembro*	25,6	25	5,6	30
Outubro*	2,0	15		
Novembro*	6,0	20		
Dezembro	22,4	50		

* déficit hídrico

5.2.3 Descrição das unidades de cobertura de materiais inconsolidados

Para compreender a variação e distribuição espacial das unidades de material inconsolidado considerou-se a classificação dos solos quanto à gênese, conforme proposto por Vargas (1978), que divide o solo em: residual, transportado, orgânico e laterítico, com base em aspectos geológicos e pedológicos. Tal classificação foi associada à proposta por Fookes (1994), que define graus de intemperismo de V e VI ao solo residual, ou seja, um elevado grau de intemperismo para os primeiros horizontes do solo, onde a rocha ou o sedimento foram totalmente decompostos e desintegrados pelos agentes intempéricos no decorrer do tempo geológico. Nesses horizontes, o material inconsolidado apresenta comportamento geotécnico de solo propriamente dito.

Desta forma, o levantamento geotécnico foi realizado com base nas características genéticas do solo, na variação de toposequências (catena), análise de amostras deformadas e indeformadas e ensaios *in situ* que subsidiaram na identificação das variações espaciais do material inconsolidado.

Foram identificadas cinco unidades, assim caracterizadas: unidade I – arenosa; unidade II – laterítica; unidade III – laterita coluvial; IV – argila mosqueada e V – aluvionar. As características dos materiais inconsolidados foram baseadas na descrição dos materiais, origem, declividade, profundidade do N.E., condutividade hidráulica, além da associação com parâmetros morfológicos do solo (Apêndices C e F).

5.2.3.1 Unidade I – Arenosa

Esta unidade corresponde ao topo do tabuleiro predominando áreas planas (0 - 2%), tendo como substrato geológico os sedimentos arenosos da Formação Barreiras. Quanto à gênese, os solos são classificados como residuais. Corresponde à unidade geológica-geotécnica III - A do mapeamento da etapa geral (Apêndice B). A profundidade do N.E. para o lençol livre é variável, com predomínio dos intervalos de 5 - 10 m e > 10 m (Apêndice E).

O material é de coloração cinza-claro a alaranjada e a granulometria aponta frações de área fina (56 a 87%), silte (3 a 17%), areia média (7 a 10%), areia grossa (0 a 8%) e argila (3 a

23%, Foto 17, Apêndices I e J) . No Sistema Unificado do Solo, é classificado como areia .O material pode atingir uma espessura que varia de 0,5 a 2 m. O limite de liquidez varia de 16 a 24 e de plasticidade de 13 a 20, indicando um índice de consistência (IC) média a rija (Apêndice M). A capacidade de troca catiônica (CTC) foi baixo (0,8 a 1,5), indicando argila caulinita (Tabelas 13 e 14, Apêndice L). Nesta unidade ocorre exploração indevida de areia para obras civis.



Foto 17 – Perfil de alteração dos materiais arenosos da unidade I no topo do tabuleiro (Ponto PB - 22, Apêndice C).

Tabela 13 – Índices físicos dos materiais inconsolidados da unidade I.

AMOSTRA	GRANULOMETRIA (%)					ÍNDICES FÍSICOS							CTC meq/100g
	ARGILA	SILTE	FINA	MÉDIA	GROSSA	ρ	ρ_S	ρ_d	e	w	n	Sr	
PB-01	2,8	2,8	87,2	6,9	0,28	1,672	2,634	1,429	0,843	17,0	45,7	53,1	0,36
PB-07	23,1	10,3	55,5	10,3	0,7	1,882	2,588	1,706	0,517	10,8	34,1	54,1	0,89
PB-22A	22,4	9,8	60,0	7,3	0,4	1,926	2,779	1,802	0,542	6,9	35,1	35,4	1,47
PB-22B	15,6	16,8	60,0	7,5	0,0	1,873	2,652	1,741	0,523	7,6	34,4	38,5	1,47
PB-29A	17,2	9,8	57,8	6,9	8,1	1,672	2,680	1,564	0,714	6,9	41,6	25,9	0,87
PB-29B	20,7	8,9	62,9	6,6	0,8	1,915	2,724	1,736	0,569	10,3	36,3	49,4	1,40

Tabela 14 - Índices de consistência dos materiais inconsolidados da unidade I.

AMOSTRAS	LL (%)	LP (%)	IP (%)	IC	CONSISTÊNCIA
PB-01	SL	SP	-	-	-
PB-07	19,8	13,7	6,1	1,47	Rija
PB-22A	19,0	13,3	5,7	2,12	Rija
PB-22B	24,0	19,8	4,2	3,90	Rija
PB-29A	15,6	0,0	15,6	0,56	Média
PB-29B	19,0	13,6	5,4	1,61	Rija

A infiltração na área varia de 12.000 a 10.000 cm³ (12 a 10 litros) em, aproximadamente, duas horas; a permeabilidade (ko) neste material em área vegetada é alta variando de 0,135 a 0,165 cm/s (Figuras 30 e 33); e a porosidade varia de 35 a 46% nas amostras analisadas (Apêndices M e N).

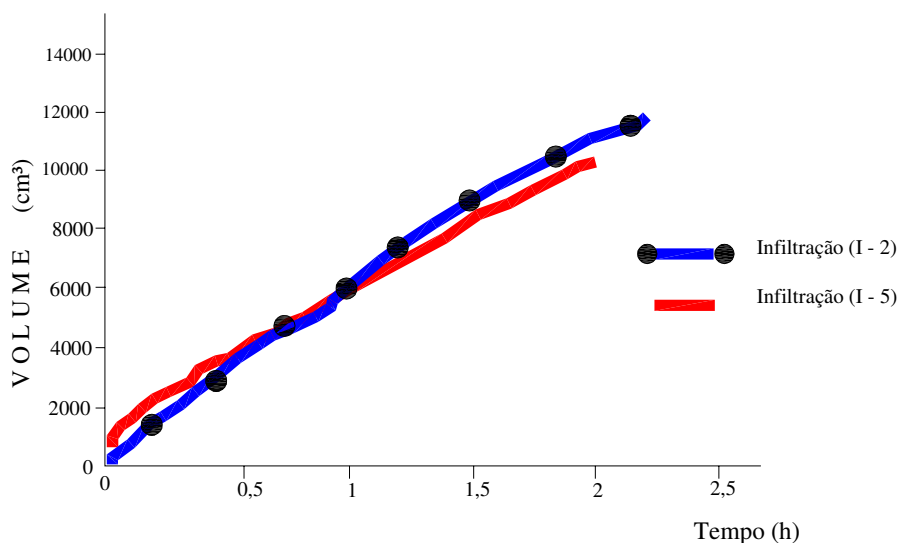


Figura 30 – Curva de volume de infiltração em área vegetada na unidade I.

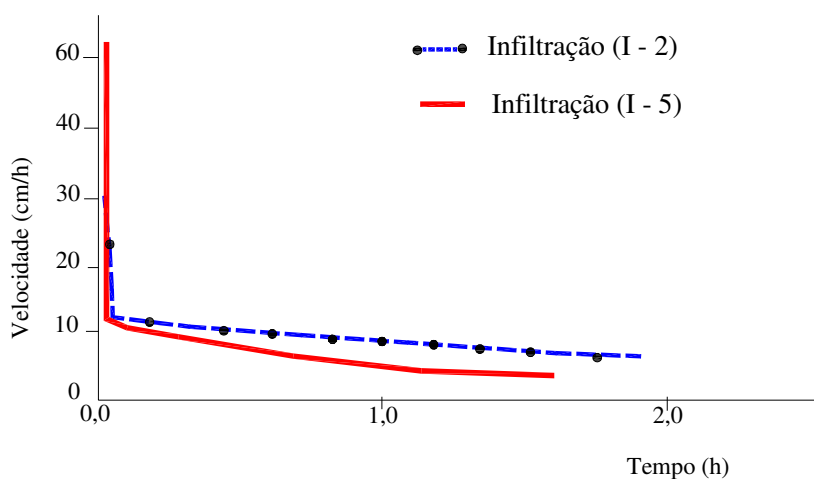


Figura 31 - Curva de velocidade da infiltração em área vegetada na unidade I.

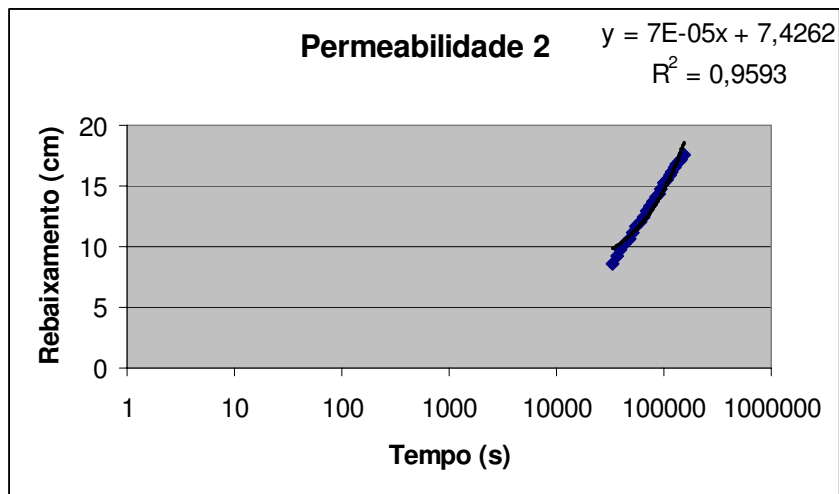


Figura 32 – Rebaixamento versus log (t) da área vegetada (I – 2) na unidade I.

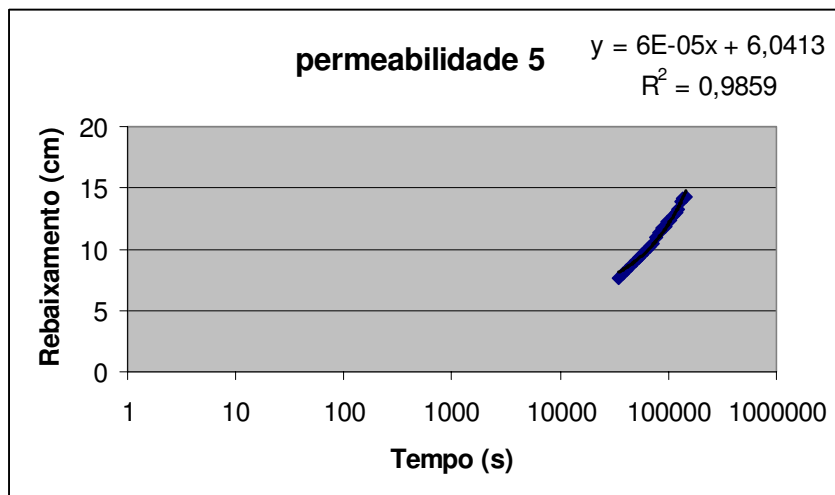


Figura 33 - Rebaixamento versus log (t) da área vegetada (I – 5) na unidade I.

Nas áreas onde a vegetação natural foi retirada e substituída por casas, com freqüente pisoteio de pessoas e animais e intensificação do tráfego de veículos, houve redução da infiltração para 8.000 cm³ em 2 horas e a permeabilidade permaneceu alta com 0,159 cm/s, observa-se que ocorre uma sensível redução no volume de infiltração (Figuras 34 e 36, Apêndices O e P).

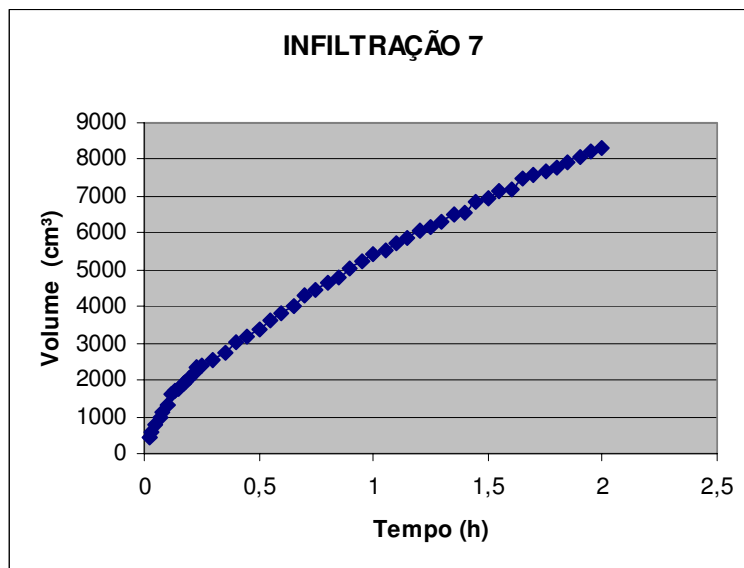


Figura 34 – Curva de volume de infiltração (I - 7) em área sem vegetação na unidade I.

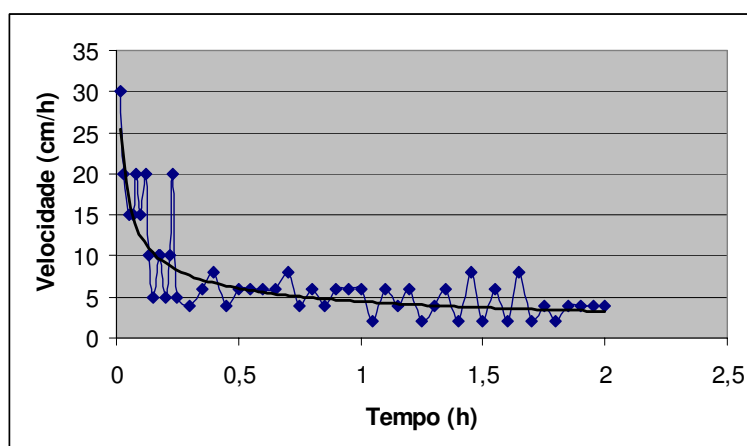


Figura 35 - Curva de velocidade da infiltração (I - 7) em área sem vegetação na unidade I.

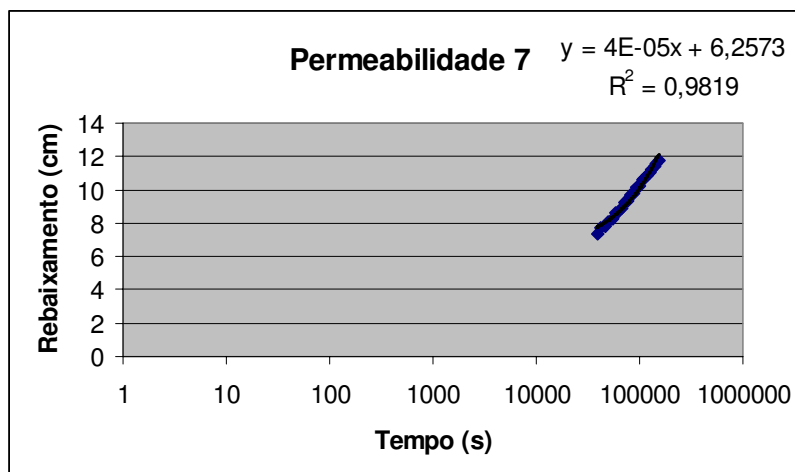


Figura 36 – Rebaixamento versus log (t) da área sem vegetação (I - 7) na unidade I.

Considerando as características geotécnicas do material inconsolidado, observa-se a suscetibilidade deste material para o selamento, com diminuição dos índices de vazios do solo, quando submetido a sucessivas alterações do meio físico.

A perda de matéria orgânica e o constante pisoteio na camada mais superficial do solo provocaram diminuição da porosidade do solo, causando uma redução no volume de infiltração no material arenoso da unidade I (Foto 18), modificando, assim, a capacidade de infiltração de água no solo.

Esta unidade é fonte potencial de recarga do aquífero quando não alterada; com o desmatamento, torna-se suscetível ao selamento.



Foto 18 - Detalhe da camada superficial com selamento da unidade I (Ponto I – 7 Apêndice C) .

5.2.3.2 Unidade II – Laterítica

Esta unidade corresponde à alta encosta do tabuleiro, com declividade variando de plana a branda (0 - 2% a 2 - 5%) ao sul do reservatório, e de moderada a íngreme a norte (5 - 15% a > 15 %), tendo como substrato geológico os sedimentos da Formação Barreiras. Quanto à gênese, os solos são classificados como residuais (Apêndice D). Corresponde à unidade geológica-geotécnica III - B da etapa geral (Apêndice B).

A profundidade do N.E. para o lençol livre é variável, predominando na área intervalos menores que 5 e de 5 a 10 metros (Apêndice E). A unidade apresenta alta suscetibilidade à erosão, potencialmente instável a rastejo de seixos e calhaus de laterita e susceptível a infiltração.

O material, de coloração vermelho-alaranjada, é constituído de concreções lateríticas, ferruginosas, mal selecionado, de tamanho variando de milimétrico a centimétrico, anguloso a sub-anguloso, com matriz predominando de areia fina (31 a 58 %), silte (10 a 18%), argila (29 a

49%), areia média (3 a 9%), areia grossa (2 a 5%), caracterizando uma matriz arenosa a argilo-arenosa (Fotos 19 a 21; Apêndices P e R). A amostra PB-30 apresentou percentagens de areia fina e areia média anômalas ao conjunto, provavelmente pelo fato de estar situada na fase de transição entre as unidades I e II.

As amostras desta unidade apresentaram limite de liquidez variando de 25 a 47 e de plasticidade 13 a 23, indicando consistência rija a dura (Apêndice R), CTC baixo (3,0 a 7,0), característico de argila caulinita.

A porosidade varia de 33 a 49%, além de considerar a grande quantidade de macroporos presentes nos horizontes ricos em laterita (Tabelas 15 e 16). O material inconsolidado pode atingir uma espessura variando de 1 a 5,0 metros. Nesta unidade ocorre exploração indevida de laterita para obras da construção civil.



Foto 19 – Detalhe da laterita da unidade de materiais inconsolidado II (Ponto PB - 02 , Apêndice C).



Foto 20 - Vista parcial das intercalações das camadas de laterita com horizontes arenosos (Ponto PB - 11, Apêndice C).



Foto 21 – Detalhe da laterita envolvida por matriz areno-argilosa (Ponto I - 5, Apêndice C).

Tabela 15 – Índices físicos dos materiais inconsolidados da unidade II.

AMOSTRA	GRANULOMETRIA (%)						ÍNDICES FÍSICOS						CTC meq/100g	
	ARGILA	SILTE	FINA	MEDIA	GROSSA		ρ	ρ_s	ρ_d	E	w %	n %		Sr %
PB-03	49,2	10,3	31,2	4,5	4,7		1,773	2,648	1,465	0,807	21,0	44,6	68,9	6,9
PB-02A	28,6	9,5	52,5	9,3	-		1,562	2,716	1,372	0,970	13,0	49,2	36,4	3,0
PB-02B	46,1	17,6	31,5	3,2	1,5		1,678	2,754	1,521	0,812	10,3	44,8	34,9	3,37
PB-30	-	-	57,9	40,2	1,8		1,894	2,722	1,837	0,482	3,1	33,0	17,5	0,00

Tabela 16 - Índices de consistência dos materiais inconsolidados da unidade II.

AMOSTRAS	LL (%)	LP (%)	IP (%)	IC	CONSISTÊNCIA
PB-03	47	17,7	29,3	0,88	Rija
PB-02A	24,9	12,6	12,2	0,96	Rija
PB-02B	35,0	22,6	12,4	1,99	Dura
PB-30	SL	SP	-	-	-

A permeabilidade neste material em área vegetada é alta (0,051 a 0,053 cm/s), com infiltração na área ensaiada de 10 a 27 litros em, aproximadamente, 1,5 h (Figuras 37 a 43, Apêndices S, U e T). Trata-se de um material inconsolidado rico em espaços poroso em decorrência das concentrações de laterita.

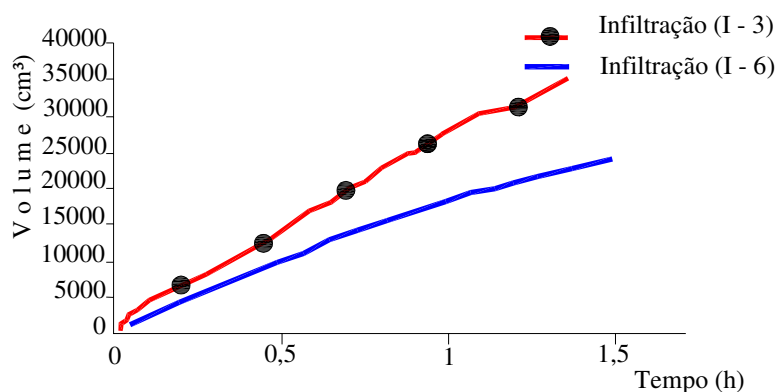


Figura 37 - Curva de infiltração em área vegetada da unidade II.

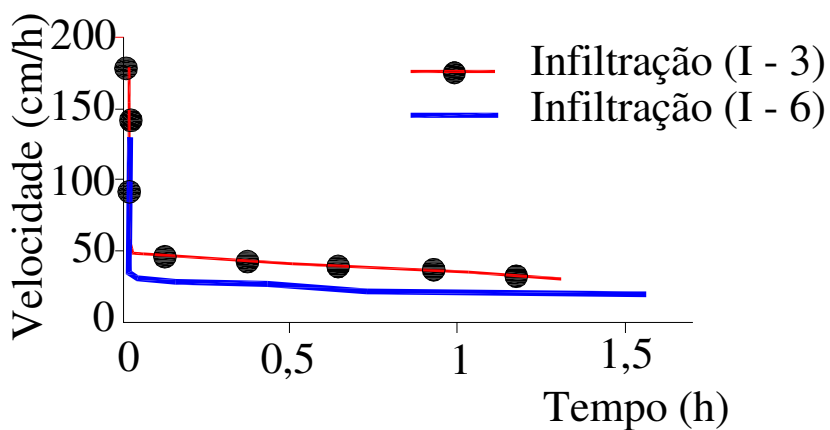


Figura 38 – Curva de velocidade de infiltração em área vegetada da unidade II.

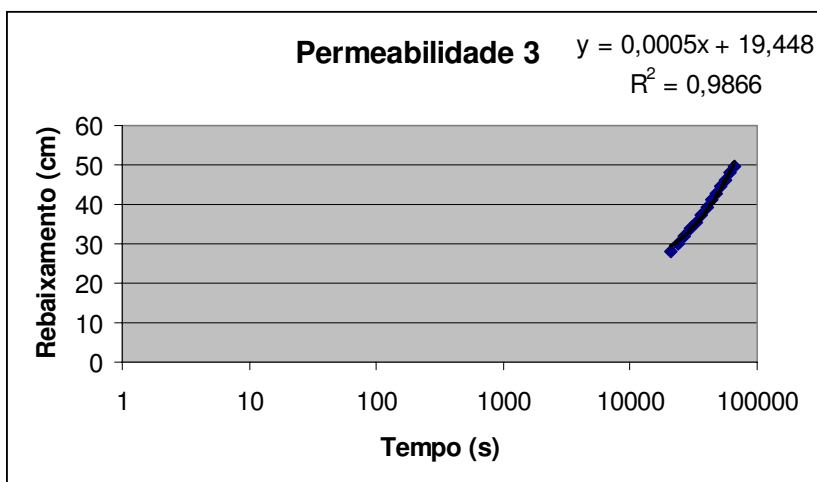


Figura 39 – Rebaixamento versus log (t) da área vegetada (I - 3) na unidade I.

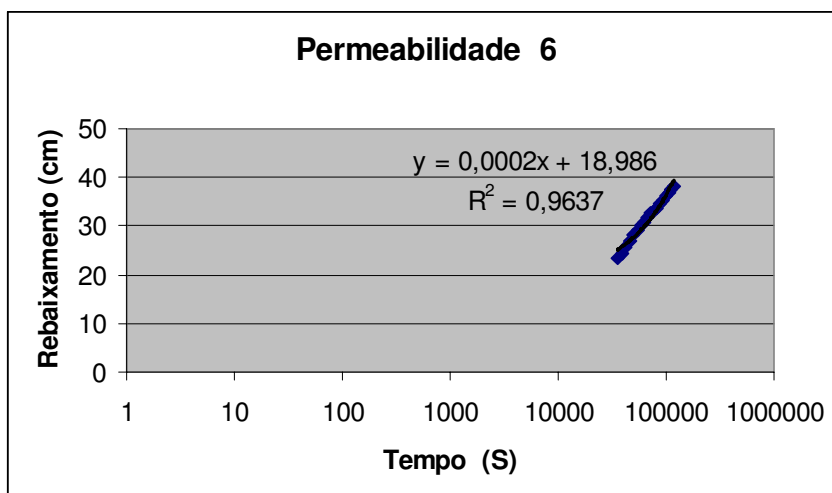


Figura 40 – Rebaixamento versus log (t) da área vegetada (I - 6) na unidade I.

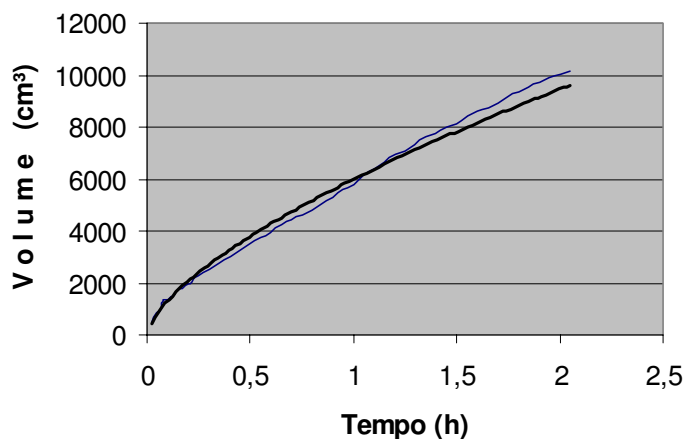


Figura 41 – Curva de volume de infiltração (I - 4) em área com vegetação na unidade II.

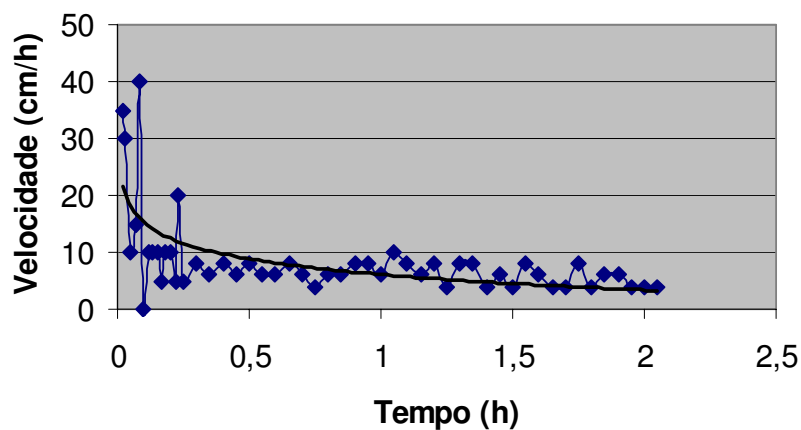


Figura 42 - Curva de velocidade da infiltração (I - 4) em área com vegetação na unidade II.

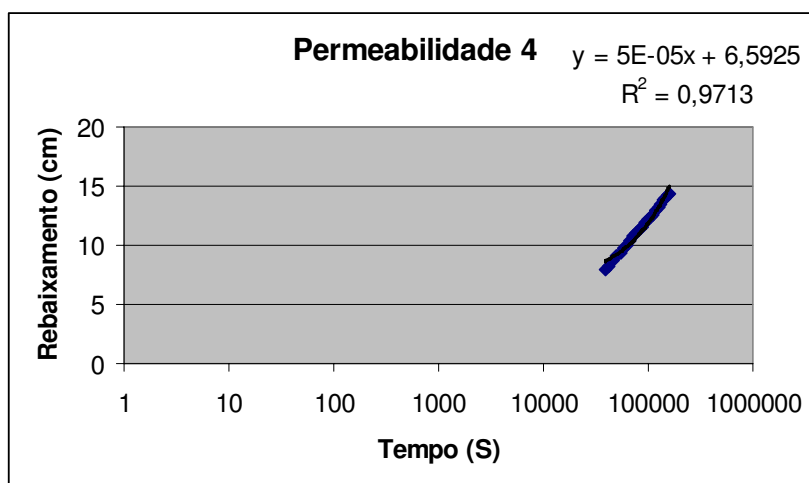


Figura 43 - Rebaixamento versus log (t) da área vegetada (I - 4) na unidade I.

5.2.3.3 Unidade III - Laterita coluvial

Esta unidade compreende área de meia a baixa encosta, com declividade variando de moderada a íngreme (5 - 10% e > 10 %). O substrato geológico constitui-se por sedimentos da Formação Barreiras e quanto à gênese, os solos são classificados como transportados. Ocorre associada à baixa encosta das colinas e às margens do Reservatório Batatã. A profundidade do N.E. para o lençol livre é menor que 5 m (Apêndices E e F). É correlacionada à unidade IV do mapa geológico-geotécnico da 1ª etapa (Apêndices C e D).

Trata-se de material arenoso de coloração vermelho-alaranjada, que apresenta granulometria predominantemente areia fina (75 a 81%), areia grossa (7 a 15%), areia média (1 a 19%), silte (2 a 9%) e argila (4 a 8%), (Fotos 23 a 25, Apêndices X e Z). Esta unidade ocorre, freqüentemente, associada a uma alta concentração de matéria orgânica, sem limite de liquidez e não plástica; contém concentrações dispersas de laterita, mal selecionadas, com tamanho variando de milimétrico a centimétrico, angulosas a sub-angulosas, bem drenadas, concentradas a partir da descida lenta de rastejo proveniente da unidade II (Tabela 17 e Fotos 22 a 24). A permeabilidade é moderada ($2,0 \times 10^{-4}$ cm/s), conforme ensaios com Permeâmetro de Quelph modificado, realizado na área da Bacia do Bacanga. O material inconsolidado pode atingir uma espessura de 1 a 2 metros. Apresenta alta suscetibilidade à erosão e instável a rastejo.



Foto 22 - Material inconsolidado arenoso da unidade III (Ponto PB - 32, Apêndice C).



Foto 23 – Feições erosivas como pedestais e lateritas dispersas (Ponto PB - 15, Apêndice C).



Foto 24 – Presença de sulcos na unidade III (Ponto PB - 15, Apêndice C).

Tabela 17 – Índices granulométricos dos materiais inconsolidados da unidade III.

AMOSTRA	GRANULOMETRIA (%)				
	ARGILA	SILTE	FINA	MEDIA	GROSSA
PB-04	-	1,78	79,21	19,00	-
PB-19	7,98	9,32	81,34	1,34	-
PB-32	3,52	5,27	68,12	7,97	15,09
PB-33	5,37	6,73	74,62	5,94	7,32

5.2.3.4 Unidade IV – Argila Mosqueada

Esta unidade ocorre nas áreas baixas de vales e baixa encosta, com declividade variando de plana a moderadamente inclinada (0 – 2 % até 5 – 10%) (Apêndice D), tendo como substrato geológico os sedimentos argilosos do Terciário Paleogeno. Quanto à gênese é classificada como residual. A profundidade do N.E. para o lençol livre é bastante variável de

menos de 5 m a mais a 10 m (Apêndices E e F). Corresponde à unidade geológica-geotécnica V individualizada para a Bacia do Rio Bacanga na etapa geral (Apêndice B).

O material apresenta coloração vermelho-arroxeadada, intensamente mosqueado, argiloso a argilo-arenoso, alta plasticidade e registro de caulinita (Foto 25). O material inconsolidado pode atingir espessura entre 1 e 3 m.



Foto 25 - Material residual intencionalmente mosqueado da unidade IV (Ponto PB -17, Apêndice C).

A condutividade hidráulica neste material na área da bacia do Rio Bacanga é considerada semi-permeável, da ordem de 10^{-4} a 10^{-5} cm/s, conforme ensaios com Permeômetro de Quelph modificado. Apresenta baixa potencialidade como aquífero e alta suscetibilidade à erosão e ao escorregamento.

5.2.3.5 Unidade V - Aluvionar

A unidade V corresponde ao fundo do vale, aplainado, onde se localiza o sangradouro da Barragem Batatã, e ao longo do vale do Rio Batatã (Apêndice F). A oeste do Reservatório Batatã tem-se a planície flúvio-marinha e ocorrência de depósitos aluvionares. O material

inconsolidado presente na área constitui-se de sedimentos transportados pertencentes à Formação Açuí, oriundos das áreas altas do tabuleiro e das colinas. Esta unidade corresponde à unidade geológica-geotécnica II - B definida na etapa geral do mapeamento progressivo (Apêndice B).

Trata-se de um material típico de depósito aluvionar, de coloração alaranjada a vermelha e esbranquiçada, textura heterogênea, fofo, mal drenado (Foto 26). A profundidade do N.E, para o lençol livre tendendo a zero onde o lençol aflora (Apêndice E). O material inconsolidado pode atingir uma espessura máxima de 1 a 2 metros.

Os principais problemas presentes na área são o grande aporte de sedimentos carreados pelos igarapés ou enxurradas, oriundos das áreas altas desprovidas de vegetação, onde os processos erosivos são marcantes. Outro problema ambiental advém da intensa poluição causada pela elevada carga de esgoto doméstico lançado *in natura* no rio Batatã que drena para o reservatório, proveniente, principalmente, dos bairros Recanto Verde e Vila Itamar.



Foto 26 - Vista parcial do depósito aluvionar presente no Rio Batatã (Ponto PB - 48, Apêndice 3).

5.2.4 Carta de Uso e Ocupação do Solo

Foi possível individualizar sete zonas de uso e ocupação do solo assim denominadas: mata ciliar, capoeira alta a média, capoeira baixa, área degradada (sem vegetação), área urbanizada, área em fase de urbanização, e de palmáceas (Apêndice G).

O reservatório Batatã situa-se na zona de uso extensivo do Parque Estadual do Bacanga, com vegetação de capoeira de média a alta, principalmente em torno do reservatório. Na zona de recuperação do Parque encontram-se as áreas degradadas e ocupações desordenadas, como as dos bairros Recanto Verde e Vila Itamar.

O bairro Recanto Verde, situado na área do Parque Estadual do Bacanga, representa uma ocupação irregular desprovida de infra-estrutura urbana. A falta de saneamento básico e coleta de lixo na área podem contribuir para a contaminação do solo e da água.

Os moradores não contam com os serviços de saneamento básico regularizados, como água, coleta de esgoto e de lixo, e energia elétrica. O fornecimento de água e energia elétrica é feito de forma irregular. Raros moradores possuem fossas sépticas, pois, geralmente, cavam um buraco onde depositam seu esgoto. O lixo produzido pode ter as seguintes destinações: enterrado, queimado ou jogado nos vales dos igarapés da área do Parque Estadual do Bacanga (Fotos 27 e 28).

O Igarapé Batatã encontra-se com suas águas aparentemente poluídas, pela observação da cor e do odor fétido que exala do córrego. As águas desse igarapé drenam diretamente para o Reservatório Batatã, alterando a qualidade da água fornecida para a população. Outro fator que merece destaque foi a construção da rodovia MA - 205 ao longo do divisor de água das bacias hidrográficas dos rios Bacanga e Tibiri, por onde trafegam, freqüentemente, veículos com cargas perigosas.



Foto 27 - Banheiro improvisado na área de recarga do tabuleiro (unidade I), (Ponto PB - 45, Apêndice C).



Foto 28 - Exposição de lixo no Vale do Rio Batatã (Ponto PB - 23, Apêndice C).

5.3 Avaliação da vulnerabilidade natural à contaminação do solo e da água subterrânea do Reservatório Batatã - Etapa de Semi - Detalhe

A integração das informações do meio físico através da carta de cobertura de materiais inconsolidado e da carta de profundidade do nível de água subterrâneo elaboradas na etapa de semi-detalle na escala de 1:10.000, permitiu uma avaliação da vulnerabilidade natural a contaminação do solo e do aquífero do Reservatório Batatã e entorno (Apêndice H).

O método GOD (FOSTER et al., 2002) foi utilizado para a avaliação da vulnerabilidade natural à contaminação do solo e do aquífero considerando as seguintes características geológicas e hidrogeológicas presentes na área de estudo:

- **1ª fase - Grau de confinamento hidráulico da água subterrânea**

O aquífero Barreiras é considerado livre por apresentar as camadas que compõem o seu substrato formada por sedimentos arenosos parcialmente consolidados constituídos por areia fina a média com intercalações de silte e argila. Sotoposta a Formação Barreiras encontram-se as rochas da Formação Terciário Paleogeno caracterizadas por argilitos e folhelhos intensamente mosqueados;

- **2ª fase – Ocorrência de estratos geológicos**

Foi considerada a cobertura de material inconsolidado presente na área que se caracteriza:

- a) A unidade I (Arenosa) predomina a areia fina com porosidade variando de 35 a 46% e com permeabilidade alta (0,135 a 0,165 cm/s) e argila caulinita, sendo atribuída o peso 0,7;
- b) A unidade II (Laterítica) caracteriza-se por concreções lateríticas ferruginosas, mal selecionada, envolvida em uma matriz arenosa a argilo-arenosa, porosidade de 33 a 49%, permeabilidade alta (0,051 a 0,053 cm/s), presença de argila caulinita, sendo atribuída um peso 0,7;
- c) A unidade III (Laterita coluvial) apresenta granulometria variável de areia grossa a argila, concentrações dispersa de laterita, mal selecionada, permeabilidade moderada $2,0 \times 10^{-4}$ cm/s, sendo atribuída peso 0,8;

- d) A unidade IV (argila mosqueada) é formada por material argiloso a argilo-arenoso, argila caulinita e a permeabilidade varia de 10^{-4} a 10^{-5} cm/s, sendo atribuída peso 0,3;
- e) A unidade V é tipicamente aluvionar, sendo atribuída peso 0,8;

• **3ª fase - Grau de confinamento hidráulico da água subterrânea**

As profundidades do nível de água subterrâneo consideradas na área foram de 1 m, 5m, 10 m, 15 m e 20 m.

Com base nesses parâmetros foi elaborada uma matriz de avaliação da vulnerabilidade natural à contaminação do solo e do aquífero (Tabela 18) considerando o grau de confinamento do aquífero, as unidades de material inconsolidado e a profundidade do nível de água subterrâneo com seus respectivos pesos, conforme o método GOD (FOSTER et al., 2002). As classes de vulnerabilidade natural à contaminação do aquífero são as seguintes conforme o método GOD: Desprezível (0,0 - 0,1), Baixa (0,1 - 0,3); Moderada (0,3 - 0,5), Alta (0,5 - 0,7), Extrema (0,7 - 1,0).

Tabela 18 – Avaliação da vulnerabilidade natural a contaminação do solo e do aquífero através do método GOD.

GRAU DE CONFINAMENTO DO AQUIFERO LIVRE BARREIRAS - PESO 1,0					
OCORRÊNCIA DE ESTRATOS GEOLÓGICOS COBERTURA DE MATERIAIS INCONSOLIDADOS					
PROF. DO N.A.	ARENOSA (I) PESO 0,7	LATERÍTICA (II) PESO 0,7	LATERITA COLUVIAL (III) PESO 0,8	ARGILA MOSQUEADA (IV) PESO 0,3	ALUVIONAR (V) PESO 0,8
1 m PESO 0,9	0,63	0,63	0,72	0,27	0,72
5 m PESO 0,9	0,63	0,63	0,72	0,27	0,72
10 m PESO 0,8	0,56	0,56	0,64	0,24	0,64
15 m PESO 0,8	0,56	0,56	0,64	0,24	0,64
20 m PESO 0,7	0,49	0,49	0,56	0,21	0,56

CLASSES DE VULNERABILIDADE

 BAIXA
  MODERADA
  ALTA
  EXTREMA

5.3.1 Carta de Vulnerabilidade natural à contaminação do solo e do aquífero do Reservatório Batatã e entorno.

A carta de vulnerabilidade natural foi elaborada na escala de 1:10.000, sendo individualizadas quatro classes: baixa, moderada, alta e extrema vulnerabilidade (Apêndice H).

A classe de extrema vulnerabilidade compreende as unidades de materiais inconsolidados III e V sendo encontrada nas bordas do reservatório e nos vales do Rio Batatã e igarapés que drenam para Reservatório Batatã. A partir da matriz de correlação (Tabela 18) pode-se observar que as classes de extrema vulnerabilidade se restringiram as unidades III e V com profundidade do nível de água subterrânea menores de 5 metros.

As áreas de alta vulnerabilidade se situam no topo e nas porções de alta e média encosta do tabuleiro caracterizada predominantemente pelas unidades de material inconsolidado I e II. Nesta área a permeabilidades é alta, varia de 0,051 a 0,165 cm/s com profundidade do N.A. variando de 1 a 20 metros.

As áreas de moderada vulnerabilidade encontram-se no divisor de águas entre a sub-bacia do Rio Batatã e Rio das Bicas, restringe-se a porção norte do reservatório, no topo e alta encosta do tabuleiro e estão relacionadas à unidade de material inconsolidado I e II, com alta permeabilidade e profundidade do N.A. de 20 metros.

As áreas de baixa vulnerabilidade compreendem a unidade de material inconsolidado V (argila mosqueada) situada na porção oeste do reservatório em baixa encosta das colinas. Trata-se de um material inconsolidado com permeabilidade moderada varia de 10^{-4} a 10^{-5} cm/s e com profundidade do nível de água subterrânea menor que 5 metros.

5.3.2 Carta de Vulnerabilidade natural e de potencial de contaminação do solo e da água subterrânea do Reservatório Batatã e entorno.

Associando os resultados obtidos na carta de vulnerabilidade natural à contaminação com a carta de uso e ocupação do solo para a área do Reservatório Batatã e entorno, pode-se avaliar o potencial de contaminação considerando as classes de uso e ocupação do solo.

O potencial de contaminação refere-se às áreas passíveis de promover a contaminação do solo e da água podendo ser uma fonte natural ou induzida. A água subterrânea está sob risco de ser contaminada principalmente pelas ações antrópicas como, por exemplo, os resíduos

urbanos e industriais (vazamentos de posto de gasolina e acidentes com produtos químicos perigosos) produzidos por diversas atividades humanas.

As áreas potenciais de contaminação presente no entorno do Reservatório Batatã foram definidas quanto a natureza da fonte e a possível geração de substâncias contaminantes. As classes definidas foram:

- A) Alto potencial de contaminação - Áreas urbanizadas;
- B) Médio potencial de contaminação - Áreas em fase de urbanização e as áreas degradadas;
- C) Baixo potencial de contaminação - Áreas naturais formada pela mata ciliar, capoeira e palmáceas.

As áreas de alto potencial de contaminação restringem-se a área do topo do tabuleiro com moderada a alta vulnerabilidade, onde esta localizada a Vila Itamar, a ferrovia, a MA - 205 e a Fábrica de Asfalto. A rodovia MA - 205 foi construída no divisor de água da bacia do Rio Bacanga e Rio Tibiri, sendo a única via de acesso rodoviário de entrada para a cidade de São Luís, com intenso tráfego de veículos, passível de ocorrência de acidentes como derramamento de óleo, gasolina e outras substâncias perigosas comumente nela transportadas.

As áreas de médio potencial esta na situada na zona de recuperação e de uso extensivo do Parque Estadual do Bacanga. A área em fase de urbanização (Recanto Verde) e degradada (sem vegetação) estão situadas em áreas de alta vulnerabilidade natural a contaminação do solo e do aquífero.

A comunidade Recanto Verde instalada irregularmente, merece um certo cuidado por parte das autoridades competente, pois não dispõe de serviços de saneamento básico e conseqüentemente pode provocar contaminações no solo e da água na área. As áreas degradadas, onde o solo está exposto as intempéries ocorrem uma intensa lixiviação provocando o assoreamento do reservatório e favorecendo o surgimento de ravinas e voçorocas na área.

As áreas de baixo potencial de contaminação estão representadas pelas áreas naturais situam-se no entorno do reservatório e requerem medidas eficazes para sua preservação e conservação dos recursos hídricos genuinamente luduvicense.

VI CONSIDERAÇÕES FINAIS, CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

6.1 Considerações Finais

A aplicação do método de detalhamento progressivo para análise da vulnerabilidade natural à contaminação do solo e aquífero do Reservatório Batatã e entorno, contribuiu para a evolução dos conhecimentos sobre o meio físico da Bacia do Rio Bacanga, considerando que as informações geológicas e geomorfológicas anteriores restringiam-se à mapas na escala de 1:100.000.

Este método, na etapa geral, apresentou como produto o mapa geológico-geotécnico da Bacia do Rio Bacanga com uma área de 106 km², na escala de 1:20.000, com uma densidade de 2 pontos/km². Foram individualizadas seis unidades geológico-geotécnicas quais sejam: unidade I – depósitos construídos, unidades II – áreas planas de fundo de vales, unidades III – terrenos associados a fácies arenosa da Formação Barreiras, unidades IV – fácies areno-argilosa da Formação Barreiras, unidade V – área de domínio da Formação Terciário Paleogeno e VI – domínio da Formação Itapecuru, baseado nas características geológicas e geomorfológicas, associadas aos processos e problemas do meio físico registrados na área.

Na etapa de semi-detulhe, a ênfase do estudo foi direcionada para avaliar a vulnerabilidade natural a contaminação do solo e do aquífero da área do Reservatório Batatã e entorno, genuinamente ludovicense, e que representa uma relevante reserva hídrica para o abastecimento público da Ilha do Maranhão.

Nessa etapa, os estudos enfocaram uma área de 6,6 km², com uma densidade de 10 pontos/km², sendo possível a elaboração de cinco cartogramas, na escala de 1:10.000, para melhor identificação da vulnerabilidade natural à contaminação do solo e do aquífero na área. As cartas de declividade, profundidade do nível de água subterrâneo, carta da superfície potenciométrica do aquífero livre Barreiras, material inconsolidado e uso e ocupação do solo forneceram as informações necessárias para serem utilizadas na avaliação da vulnerabilidade natural através do método GOD (FOSTER et al., 2002).

A área do tabuleiro, com as maiores elevações altimétricas da ilha (60 m), pertencente à unidade I da carta de materiais inconsolidados, representa área de recarga de aquífero, caracterizada por alta condutividade hidráulica (0,135 a 0,165 cm/h). Apresenta alto potencial hidráulico, capaz de distribuir água de infiltração para as áreas mais baixas, alimentando as

reservas de água subterrânea e, conseqüentemente, a bateria de 11 poços da CAEMA localizados na área de descarga.

A integração dos dados na etapa de semi-detelhe das cartas de profundidade do nível de água subterrâneo e material inconsolidado utilizando o método GOD gerou a carta de vulnerabilidade natural a contaminação do solo e do aquífero e superpondo estas informações a carta de uso e ocupação foi elaborada a carta de vulnerabilidade e de potencial de contaminação do solo e do aquífero do Reservatório Batatã.

6.2 Conclusões

Considerando os objetivos propostos neste estudo, pode-se constatar que foi possível atingir com êxito a elaboração dos documentos cartográficos propostos para análise da vulnerabilidade natural e de potencial a contaminação do solo e do aquífero. Tratam-se de ferramentas indispensáveis para subsidiar o planejamento do uso e ocupação do solo, e para realização da gestão na instalação e funcionamento de futuros empreendimentos, com alterações significativas, portanto com alto potencial de impacto ambiental, principalmente em um ecossistema frágil como as Ilhas Oceânicas.

Com base nos resultados obtidos no desenvolvimento deste estudo, conclui-se que:

As áreas de extrema vulnerabilidade referem-se as áreas de borda do Reservatório Batatã, e aos vales dos igarapés, porém estas áreas representam baixo potencial de contaminação do solo e das águas subterrâneas por se apresentarem coberta de vegetação.

As áreas classificadas como de alta vulnerabilidade natural a contaminação do solo e do aquífero pertencem a unidade I e II de materiais inconsolidados (etapa de semi-detelhe) representada por areias finas e por concreções lateríticas envolvidas em matriz areno-argilosa, apresentando porosidade variando de 25 a 54%, além da macro porosidade oferecida pelas concentrações de lateritas mal selecionadas, limite de liquidez de dura a média, índice de plasticidade (13 a 23), alta permeabilidade (0,051 a 0,165 cm/s), CTC baixo, cuja argila é a caulinita. Esta unidade de material inconsolidado tem como substrato a fácies arenosa da Formação Barreiras presente nos tabuleiros da porção SE da Bacia do Bacanga.

Os tabuleiros são áreas de recarga do aquífero indispensáveis para manutenção das reservas hídricas da Ilha do Maranhão, pois, representam áreas altas e planas, onde a especulação imobiliária é muito forte e desenfreada. Essas áreas devem ser protegidas por lei municipal para manutenção das reservas hídricas genuinamente ludovicenses. Estas áreas

quando submetidas à retirada de vegetação reduzem seus espaços porosos tornando-se susceptível ao selamento, reduzindo o volume de infiltração. Este fato merece destaque, pois as áreas vegetadas do Parque e da Ilha precisam ser preservadas. Por outro lado, as áreas de alta vulnerabilidade e alto potencial situadas no divisor de água das Bacias do Rio Bacanga e Rio Tibiri apresentam intensamente urbanizadas, onde se situa a rodovia MA 205, que representa riscos iminentes para a qualidade da água da bacia.

As áreas de moderada vulnerabilidade natural situadas no tabuleiro, especificamente nas áreas do divisor de água das sub-bacias do Rio Batatã e Rio das Bicas, apresentam de médio a baixo potencial de contaminação, onde situam-se as áreas degradadas e de capoeira do parque, sugerindo ações de recuperação através de reflorestamento dessas áreas.

As áreas de baixa vulnerabilidade natural à contaminação do solo e do aquífero situam-se na porção oeste do reservatório, representadas pela unidade de materiais inconsolidado IV e representam baixo potencial de contaminação, com vegetação de capoeira e situadas na área de uso extensivo do Parque Estadual do Bacanga.

Faz-se necessária a adoção de gestão e planejamento territorial, em consonância com as propriedades geológico-geotécnicas da Ilha do Maranhão, pois a argila caulinita com capacidade de troca catiônica variando de 0,36 a 1,47 predomina nos sedimentos argilosos da Formação Barreiras e Terciário Paleogeno. A argila caulinita apresenta baixa adsorção de metais pesados, sugerindo mais critérios na tomada de decisão por parte do poder público na escolha de projetos para o desenvolvimento sócio-econômico na Ilha, para evitar riscos geológicos.

Na área de recuperação do Parque Estadual do Bacanga torna-se necessário o reflorestamento das áreas degradadas (sem vegetação) das unidades de materiais inconsolidados I e II, pois são consideradas áreas vulneráveis à ocorrência de processos erosivos já instalados que contribuem para o assoreamento das áreas de palmáceas e do Reservatório Batatã.

Quanto à comunidade instalada, irregularmente, no Recanto Verde, na área de alta vulnerabilidade natural a contaminação do solo e do aquífero do Reservatório Batatã, recomenda-se a imediata legalização do bairro de modo a receber infra-estrutura básica especial, com manejo preservacionista, e assim, minimizar os impactos ambientais nas áreas de recarga de aquífero (unidades de materiais inconsolidados I e II).

Para a comunidade instalada no Parque Estadual do Bacanga e em sua área de amortecimento necessário a implementação de políticas públicas voltadas para a preservação

e conservação do Parque, uma vez que representa um bolsão verde junto ao centro urbano. Tais políticas podem ser viabilizadas por meio de projetos de educação ambiental, a serem oferecidos por instituições públicas de ensino ou organizações não-governamentais (ONGs), além da adoção de medidas mais eficazes nas áreas protegidas do Parque.

6.3 Recomendações

Na área foram caracterizados três grupos de chuvas, com duração de 5 -15 minutos (A), 20 a 40 minutos (B) e acima de 50 minutos (C). Os grupos A e B são propícios para promover a infiltração da água no solo, considerando que são de baixa intensidade e curta duração. Este trabalho precisa ser mais aprofundado para caracterização da capacidade de infiltração através de simulação de cenários de infiltração dos materiais inconsolidados.

Integrar as informações geológicas-geotécnicas e hidrogeológicas em uma linguagem acessível através de uma cartilha com enfoque em educação ambiental para serem difundidas nos órgãos públicos e comunidades.

Estudos complementares e mais detalhados, seguindo o método de detalhamento progressivo (Cerri et al., 1996) podem ser propostos e orientados pelos produtos cartográficos gerados nesta pesquisa. Especificamente, para a área do Reservatório Batatã, sugere-se um estudo de caracterização geotécnica com geração de mapa na escala de 1:5.000, onde conste um cadastramento das fontes potenciais de contaminação.

VII REFERÊNCIAS

AB'SABER, A.N.. Contribuição a geomorfologia do Estado do Maranhão. *Notícias Geomorfológicas*, V.3, nº 5, p. 35-44, abr., 1960.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEL *O Estado das águas no Brasil-1999* perspectiva de gestão e informação de recursos hídricos. Brasília: ANELL/MMA/SRH, 1999, 334 p.

ALLER, L. et al. *DRASTIC: a standardized system for evaluating groundwater pollution potential using hidrogeologic settings*. EUA: EPA, EPA/600/2-87/035, 1987.

ALMEIDA FILHO, G.S.DE. *Diagnóstico de processos erosivos lineares associados a eventos pluviosos no município de Bauru, SP*. 2000, Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade de Campinas, Campinas, 2000.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA - ABGE. *Glossário de termos técnicos de geologia de engenharia: hidrologia*, 1ª edição, São Paulo: ABGE, 1981, 34 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS- *NBR 6459*. Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS- *NBR 6508*. Grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm; determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS- *NBR 7180*. Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 1984.

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

AUGUSTO FILHO, O. Caracterização geológico-geotécnico voltada à estabilização de encostas. Uma proposta metodológica. In: *Conferência Brasileira Sobre Estabilidade de Encostas 1, Rio de Janeiro*. Anais... Rio de Janeiro, p. 721-733, 1992.

AUGUSTO FILHO, O. Escorregamentos em encostas naturais e ocupadas: análise e controle. In: BITAR, O. Y. *Curso de geologia aplicada ao meio ambiente*. São Paulo: ABGE, 1995, p. 77 - 100.

AUTODESK, AUTOCAD MAP 2000i. USA: AUTODESK, 2000, 2CD.

AZEVEDO, A.A.; ALBUQUERQUE FILHO Águas Subterrâneas. In: SANTOS, A.M. e BRITO, S.N.A. *Geologia de Engenharia*. São Paulo: ABGE, 1998, p.111 – 130.

BACHION, M.L.; RODRIGUES, J.E. Carta de potencial ao escoamento superficial da região sudoeste do Município de Campinas –SP, escala 1: 25.000. In: *Simpósio Brasileiro de Cartografia Geotécnica*, 3; 1998, Florianópolis. Anais ... Florianópolis. ABGE, 1998.

BARBOSA, G.V.; PINTO, M.N. Geomorfologia da Folha SA 23 São Luís e parte da Folha SA 24 Fortaleza,. In: *Levantamento de Recursos Naturais: geologia, geomorfologia, solo, vegetação e uso potencial da terra*. Rio de Janeiro: MME, 1993,V.3.

BARCHA, S.F.; BRANCO, C.C.Z. Influência de fossas negras e de vazamento da rede de esgoto na poluição do aquífero por nitrato na zona urbana de São José Rio Preto, S.P.. *Simpósio Geologia Sudeste,2*; 1991, São Paulo. Anais...São Paulo: SBG/SP-RJ, 1991.

BRANDÃO, V.S.; PRUSKI, F.F.; SILVA, D.D. *Infiltração da água no solo*, Viçosa: UFV, 2002, 98 p.

BRASIL. Decreto Federal nº 24.643 de 10 de julho de 1934 – *Institui o Código das Águas*. Diário Oficial da União, Brasília (DF), julho, 1934.

_____ Lei Federal nº 6938 de 31 de agosto de 1981 – *Dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação e dá outras providências*. Diário Oficial da União, Brasília (DF), 02 de setembro de 1981.

_____ *Constituição da República Federativa do Brasil*, Câmara dos Deputados, Brasília (DF): Senado, 1988.

_____ Lei Federal nº 9433 de 8 de janeiro de 1997 – *Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria a Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do Art. 21 da Constituição Federal e altera o Art. 1º da Lei nº 8.001 de 13 de março de 1990 que modificou a Lei nº 7990 de 28 de dezembro de 1989 e dá outras providências*. Diário Oficial da União, Brasília (DF), janeiro, 1997.

_____ Lei Federal nº 9984 de 17 de julho de 2000 – *Dispõe sobre a criação da Agência Nacional de Águas – ANA, entidade federal de implantação da Política Nacional de Recursos Hídricos e de coordenação do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos e dá providências*. Diário Oficial da União, Brasília (DF), julho, 2000.

BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. *Conservação do solo*. São Paulo:Ícone , 1990, 355 p.

BIGARELLA, J. J.; BECHER, R. D.; SANTOS, G. F. *Estrutura e origem das paisagens tropicais e subtropicais*. Florianópolis: UFSC, 1994, 424 p.

BLIGHT, G. E. *Mechanics of Residual Soils. A Guide to the formation, classification and geotechnical properties of residual soils with adoice of geotechnical design* Chair man of Technical Committee 25, *International Society for Soil Machanics and Foundation Engimeerin*, BALKEMA/SOUTH AFRICA, 1997.

BOVOLATO, L. E. Estudos de vulnerabilidade à contaminação de águas subterrâneas utilizando a metodologia GOD para a área urbana de Araguaiana - TO: *Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*, 16, 2005, João Pessoa(PB), Anais ... João Pessoa: ABRH, cd-room, 2005.

BURROUGH, P.A.; HEUVELINK, G.B.M. The sensitivity of Boolean and continuous (Fuzzy) logical modeling to uncertain data. In: *European Conference and exhibition on Geographical Information, Systems Munich, 3*. Munich (Germany), 1992, p.1033-1041.

CANDIDO, L.W.; ZAINÉ, J. E..Identificação e mapeamento de cavas e pilhas de bota-fora de mineração como unidade geológica-geotécnica no município de Estiva Gerbi-SP. In: *Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia e Ambiental, 11 e Reunião de Geologia Ambiental e Planejamento Territorial do Mercosul, 21*. Florianópolis (SC), Anais ... Florianópolis : ABGE, 1 cd-room, 2005.

CEDERGREEN, H. R. *Seepage, drainage and flow nets*. New York: John Willey and Sons, 465 p., 1989.

CERRI, L. E. S . Cartas geotécnicas: contribuição para uma concepção voltada as necessidades brasileira. *Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia, 6*, 1990, Salvador, Anais ... Salvador: ABGE, v.1, 1990, p. 309-317.

CERRI, L. E. S.; AKIOSSI, A.; AUGUSTO FILHO, O.; ZAINÉ, J. E. Cartas e mapas geotécnico de áreas urbanas: reflexões sobre as escalas de trabalho e proposta de elaboração com o emprego do método do detalhamento progressivo. In: *Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia, 8*, Rio de Janeiro, Anais... Rio de Janeiro: ABGE, 1996, p. 537-548.

CHORLEY, R. J.; SCHUMM, S. A.; SUDGEN, D. E. *Geomorfology*, London: Methuen, 1984, 605 p.

CHRISTOFOLETTI, A. *Geomorfologia*, 2 ed., São Paulo: Edgar Blucher, 1980, 188 p.

CHUVAS AUMENTAM os problemas em bairros, *O ESTADO DO MARANHÃO*, São Luís, 07, mar., 1994. Caderno Cidade.

CHUVAS CASTIGAM a periferia, *O ESTADO DO MARANHÃO*, São Luís, 07, mar., 1994. Caderno Cidade.

COLARES, J.Q.S.; ARAÚJO, C.C. *Projeto Especial Mapas de Recursos Minerais: de solos e de vegetação para a área do Programa Grande Carajás – Sub-Programa Recursos Minerais. Folha Santa-Inês (SA-23-Y-D), escala 1:250.000, V.1, Recife: DNPM/CPRM, 1990.*

COMPANHIA DE ÁGUA E ESGOTO DO ESTADO DO MARANHÃO – CAEMA- *Abastecimento de água da região metropolitana da Ilha de São Luís*.Relatório Interno, CAEMA, 2005, 4p.

COMPANHIA DE ÁGUA E ESGOTO DO ESTADO DO MARANHÃO-CAEMA: São Luis: AERODATA, 1988, *Fotografia Aérea*, escala 1:8.000.

COOKE. R.U.; DOORNKAMP, J.C. *Geomorfology in Enviroment Management: a new introduction*. 2 ed., Oxford: Clarendon Press, 1990, 410 p.

COSTA, H. O. S. *Análise Hidrológica Aplicada à Gestão Águas – região oeste da ilha de São Luis- Ma.* 2003, 68 f. Especialização em meio ambiente e recursos hídricos – Universidade Estadual do Maranhão, São Luis, 2003.

DE BIASE, M. Cartas de declividade: confecção e atualizações. *Geomorfologia*, São Paulo, v.10, p. 8-13, 1970.

DESMATAMENTO ameaça o Batatã, *O ESTADO DO MARANHÃO*, São Luís, 07, mar., 1994. Caderno Cidade.

DIRETORIA DE SERVIÇO GEOGRÁFICO –DSG – *Mapa Planialtimétrico*, Folhas 21,22,23,29,30,31,37,38 e 39, escala 1:10.000, São Luis: DSG, 1980.

DUCHAUFOR, P. *Pedology Pedogenesis and Classifications*. English Edition (Trans, T. R. Paton) George Allen and Unwin, Londo, 1982.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. *Sistema Brasileiro de Classificação de Solos*, Brasília: EMBRAPA SOLOS (RJ), 1999, 412 p.

Environmental Protection Agency – EPA. *Estimation of infiltration rate in the vadose zone: Application of selected mathematical models*, USA, 1998, v. I, Disponível em < <http://oaspub.epa.gov>>. acesso em 4 jan. 2003.

FERREIRA A. *A urbanização e a problemática ambiental em São Luis - Ma*, 1993, 88 f. monografia em geografia, Universidade Federal do Maranhão, 1993.

FERREIRA, S.T. *Estudos da vulnerabilidade à contaminação das água subterrânea na região de Ribeirão Preto - SP.* 2001, 69 f. Dissertação (Mestrado em Meio Ambiente) – Universidade Estadual Paulista – UNESP, Rio Claro, 2001.

FETTER, C. W. *Applied hydrogeology*, 4 ed., New Jersey: Prentice Hall, 2001, 256 p.

FIORI, C.O. *Contribuição ao estudo das Formações Superficiais das quadrículas de Piracicaba e São Pedro.* 1980, 120 f. Dissertação (Mestrado em Meio Ambiente) – Universidade Estadual Paulista – IGCE/UNESP, Rio Claro, 1980.

F. JUNIOR et al. *Acuífer detrítico costero de Ponta da Madeira – Maranhão, Brasil, Modelización Hydrogeológica Preliminar.* Tecnologia de intrusion de água de mar em Acuíferos costeros. Madrid: IGME, 2003, p. 281-290.

FOOKS, P. G. *A Review: Genesis and Classification of Tropical residual soils for engineers*, IN: BLIGHT et al. (eds). *Geotechnics in the African Enviroment*. V. 2, Baikema, 1994.

FORNASARI FILHO, N. et al (coord.). *Alterações no meio físico decorrentes de obras de engenharia*. São Paulo: IPT,1972.

FORNASARI FILHO, N. et al. Processo do meio físico como objeto da geologia de engenharia nos estudos de impacto ambiental. In: FORNASSARI FILHO N. (coord.) *O meio*

físico em estudos de impacto ambiental. Boletim Técnico do Instituto de Pesquisa Tecnológica – IPT, São Paulo:, n. 56, p. 18-23,1990.

FORTES chuvas causam inundações e desabamentos em toda São Luís, *O ESTADO DO MARANHÃO*, São Luís, 07, mar., 1994. Caderno Cidade.

FOSTER, S. et al. *Groundwater quality protection*. Washington: WHO/CEPIS, 2002, 103 p.

FOSTER, S.; HIRATA, R..*Groundwater pollution risk assesment a methodology USING available data*, technical manual, Lima: WHO.PAHO/HPE-CEPIS, 1988.

FOSTER, S.; HIRATA, R..Determinacion del riesgo de contaminacion de aguas subterranas: una metodología basada en datos existents. Lima: CEPIS, 1991.

FOSTER, S.; VENTURA, M.; HIRATA, R..Contaminacion de las aguas subterranas: um enfoque ejecutivo de la situación em América Latina y el Caribe em relación com el suministro de agua potable. Lima: CEPIS, 1987.

GAMEIRO, M.G. *Avaliação de métodos para obtenção dos fatores “L” e “S” da EUPS numa bacia, via processamento e banco de dados*. 2003, 116 f. Dissertação (Mestrado em sensoriamento remoto) – INPE, São José dos Campos, 2003.

GRIEBELER, N.P. et al. Modelo para a determinação do espaçamento entre desaguadouros em estradas não pavimentadas. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Campinas, v. 29, 2005, p. 397-405.

GOLDEN SOFTWARE. *SURFER 7*, Colorado (USA), 1999, 1CD.

GUERRA, A.T.; GUERRA, A.J.T. *Novo dicionário geológico-geomorfológico*. Rio de janeiro: Bertrand Brasil, 1997, 652p.

GUIGUER, N.; KOHNKE, M.W. Métodos para determinação da vulnerabilidade de aquífero. *Congresso Brasileiro de Água Subterrânea*, 12; 2002, Florianópolis. Anais...Florianópolis: ABAS, 2002.

HIRATA, R. Recursos Hídricos. In: TEIXEIRA, W. et al. (Org.) *Decifrando a terra*, 2 ed., São Paulo: Oficina de textos, p. 422-444, 2001.

IAEG *Guide pour la preparation des cartas geotechniques les presses de l’UNESCO*. Paris, 1976, 79 p.

INFANTI JR.N.; FORNASSARI FILHO, N. *Processos de dinâmica superficial*. In: OLIVEIRA, A.M.S.; BRITO, S.N.A. (Ed.) *Geologia de Engenharia*. São Paulo: ABGE, p. 131-152, 1998.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAL – INPE – São Luis: São José dos Campos, 1989, Fotografia aérea, escala 1:15:000.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. *Mapa de Unidades de relevo*: escala 1:5.000.000, Brasília, 1993.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. SENSO DEMOGRÁFICO, 2000, Brasília : IBGE, on line. Disponível em <[http:// www.ibge.gov.br](http://www.ibge.gov.br)>. Acesso em dez. 2002.

INSTITUTO DE PESQUISA TECNOLÓGICAS – IPT. *Orientações de área de combate à erosão no Estado de São Paulo, Bacia do Peixe – Paranapanema*. São Paulo: IPT/DAEE, 1986, 6v. (IPT relatório 24739).

JORGE, F.N.; UEHARA, K. Águas de superfície. In: SANTOS, A.M. e BRITO, S.N.A. *Geologia de Engenharia*. São Paulo: ABGE, 1998, p.101 – 109.

JUNIOR CAPRI, S. *Process erosivos, recursos hídricos e riscos ambientais na Bacia do Rio Mogi-Guaçu*. 2001, 150 f. Tese (Doutorado em Geologia e Meio Ambiente) – Universidade Estadual Paulista – IGCE/UNESP, Rio Claro, 2001.

KARMANN, I. Ciclo da água, água subterrânea e sua ação geológica, In: TEIXEIRA, W. et al. (Org.) *Decifrando a terra*, 2 ed., São Paulo: Oficina de textos, 2001, p. 114-138.

KOHNKE. M. *Vulnerabilidade de aquíferos*, São Paulo: ABAS, on line, 2005. < , Disponível em < <http://www.abas.org.br>>. acesso em 14 nov. 2005.

LABOHIDRO, *Diagnóstico Ambiental do Estuário Bacanga ,Ilha de São Luís - Ma*: Caracterização Química e Biológica. São Luís (MA): UFMA, 1999, 57 p., Relatório.

LEITE, F.P.R. *Palinofloras Neógenas da Formação Pirabas e Grupo Barreiras, área litorânea nordeste do Estado do Pará, Brasil*, 102 f. Dissertação (Mestrado em geologia sedimentar) – USP/Instituto de Geociências, São Paulo, 1997.

LEITE, L. W. Tabuleiros Costeiros de Sergipe: um estudo preliminar. *Notícias Geomorfologica*, Campinas, v.13, n.26, p. 33-54, dez. 1973.

LIBARDI, P. L. *Dinâmica da água no solo*. Piracicaba: ESALQ/USP, 1980, 500p.

LOLLO, J. A.; ZUQUETTE, L.V. Utilização da técnica de avaliação do terreno em cartografia geotécnica: sistemática proposta e resultados obtidos para a quadrícula de Campinas. *Simpósio Brasileiro de Cartografia Geotécnica*, 2, 1996, São Carlos, Anais...São Carlos: ABGE, 1996, 3-12 p.

LOPES, P.M.S.; PEJON, J. O. Utilização de SIG-Idrisi na elaboração das cartas de potencial à infiltração, susceptibilidade à erosão e de potencial agrícola. *Simpósio Brasileiro de Cartografia Geotécnica*. 4, Brasília, 2001, Anais...Brasília: ABGE, cd-rom, 2001.

MACHADO, S.L.; CARVALHO, M.F.;MATTA,B.M.*Utilização do Permeâmetro Guelph para estudo da condutividade hidráulica de solos residuais de granulitos da cidade de Salvador-Ba*. 1994. Disponível em <http://www.geoamb.eng.ufba.br/ftp/arquivos/Nsat_b.pdf> acesso 01/02/2005.

MANOEL FILHO, J. Ocorrência das água subterrâneas, In: FEITOSA, F.A.C.; MANOEL FILHO, Jr. (Coord). *Hidrologia: Conceitos e aplicações*, Fortaleza: CPRM, 1997, 389 p.

MARANHÃO, Decreto Estadual nº 7.545 de 07 de março de 1980 – *Cria o Parque Estadual do Bacanga e dá outras providências*. Diário Oficial Estadual , nº 56 de 21 de março de 1980.

_____,Secretaria de Estado do Meio Ambiente e Recursos Hídricos. Programa Estadual de Gerenciamento Costeiro. Macrozoneamento diagnóstico ambiental da microregião de aglomeração urbana de São Luís. *Estudo de ocupação espacial e cobertura da terra*, São Luís: SEMA/GERCO, 1997, 137 p. Apostila.

_____,Secretaria de Estado do Meio Ambiente e Recursos Hídricos. Programa Estadual de Gerenciamento Costeiro. Macrozoneamento do Golfão Maranhense. Diagnóstico Ambiental da Microrregião da Aglomeração Urbana de São Luís e dos municípios de Alcântara, Bacabeira e Rosário. *Estudo de Geologia – São Luís*: SEMA/MMA/PNMA, 1998a, 31p. Apostila.

_____,Secretaria de Estado do Meio Ambiente e Recursos Hídricos. Programa Estadual de Gerenciamento Costeiro Macrozoneamento diagnóstico ambiental da microregião de aglomeração urbana de São Luís e dos municípios de Alcântara, Bacabeira e Rosário. *Estudo de Pedologia e cobertura vegetal*. São Luís: SEMA/GERCO, 1998b, 186 p., Apostila.

_____,*Parque Estadual do Bacanga* atualização do plano de manejo, São Luís, ELETRONORTE, 6280/2, 30p. relatório, 2002.

_____,*Zoneamento ecológico-econômico do Estado do Maranhão*. Maranhão:Governo do Estado do Maranhão, 2006, Disponível em < <http://www.zee.ma.gov.br>>. acesso em 4 jan., 2006.

MARQUES, H. *Contaminação de água quintuplica*.UNIAGUA. on line, 2005. Disponível em < <http://www.unique.org.br>>. acesso em 14 jan. 2006.

MATULA, M. Environmental aspects of engineering geological mapping. IN: *International congress of geology*, 25, Sydney, 1976.

Mc COY, J.; JOHNSTON, K. *USING ARC GIS 8 SPATIAL ANALYST*. USA:ESRI, 2001.

MEAULO, F. *Vulnerabilidade natural à contaminação dos recursos hídricos subterrâneo da área de Araraquara (SP)*. 2004, 108 f. Dissertação (Mestrado em Geologia e Meio Ambiente) – Universidade Estadual Paulista – IGCE/UNESP, Rio Claro, 2004.

MICROSOFT OFICCE 2000 PROFESSIONAL.[S.I]: *MICROSOFT CORPORATION*, 2000, 1 CD.

MONIZ, A. C. (ord.). *Elementos de Pedologia* Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 460 p., 1975.

MOREIRA, C.V.R.; PIRES NETO, A.G. Clima e Relevo. In: SANTOS, A.M. e BRITO, S.N.A. *Geologia de Engenharia*. São Paulo: ABGE, 1998, p.69 – 85.

MOREIRA, F.R.S. Uso e avaliação de técnicas de integração e análise espacial de dados em pesquisa mineral aplicadas ao Planalto de Poços de Caldas, 146 f. Dissertação (Mestrado em sensoriamento remoto), INPE, São José dos Campos, 2001.

MORETI, D. et al. Importantes características de chuva para conservação do solo e da água no município de São Manuel (SP). *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 27, p. 713-725, 2003.

MOUCHEREK, J.; AROUCHE, T. Reserva do Batatã no limite. *O IMPARCIAL*, São Luís, 15, Fev., 2005.

NAKAZAWA, V. A. et al. Cartografia geotécnica: A aplicação como pressuposto, *Simpósio Geológico do Sudeste*. 2, São Paulo, 1991, Anais...São Paulo: SBG, 1991, p. 329-336.

NARCISO, M.G.; GOMES L.P. Análise espacial da área de influência do aquífero da Serra das Areias – carta de vulnerabilidade à poluição. *Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*. 12, Goiânia, 2005, Anais...Goiânia: INPE, 2005, p. 3851-3861.

NISHIMURA, L.; ZUQUETTE, L. V. Importância da cartografia geotécnica para caracterização de áreas de vulnerabilidade de aquífero livre: exemplo do aquífero Botucatu na quadrícula de São Carlos, SP. *Revista de Geociências*, São Paulo, v. 13, n. 2, p. 345-357, 1994.

NOGUEIRA, J. B. *Mecânica dos solos*: ensaios de laboratório. São Carlos: EESC-USP, 1995, 248 p.

NOLASCO, M.C. *Registros geológicos gerados pelo garimpo. Lavras Diamantinas – BA*. 2002, 316 f. Tese (Doutorado) – Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.

OLIVEIRA, A.M.S. Assoreamento em cursos e corpos d'água. In: BITAR, O.Y. *Curso de geologia aplicada ao meio ambiente* (coord.), São Paulo: ABGE, 1995, p. 59-99.

OLIVEIRA, A.M.S. *Depósitos tecnogênicos e assoreamento de reservatório. Exemplo do reservatório de Capivara, Rio Paranapanema, SP/PR*. 1994, 211 f. Tese de Doutorado – FFLCH- USP, São Paulo, 1994.

OLIVEIRA, A.M.S. et al. Tecnógeno: registro da ação geológica do homem. In: SOUZA, C.R.G. et al. (Ed.) *Quaternário do Brasil*. Ribeirão Preto: Holos, 2005, p. 363-376.

PARALTA, E. A.; FRANCES, A. P. *Caracterização hidrogeológica e avaliação da vulnerabilidade à poluição do complexo gabro-diorítico de Serpa-Brinches (Setor Oriental do sistema aquífero dos Gabros de Beja)*. Associação Portuguesa de Geólogos, GEONOVAS, n. 14, p. 27-35, 2000.

PEJON, O. J. *Mapeamento geotécnico da Folha de Piracicaba –SP, esc. 1. 100.000: Estudo de Aspectos Metodológicos de caracterização e de apresentação dos atributos*. Tese de doutorado, Escola de engenharia de São Carlos, USP, 225 p., 1992.

PEJON, O. J.; ZUQUETTE, L. V. Carta do potencial de escoamento superficial da Folha de Piracicaba, SP. *Revista Brasileira de Geociências*, São Paulo, v. 12, n. 2, 1993, p. 515-529.

PELOGGIA, A. *O homem e o ambiente geológico: geologia, sociedade e ocupação urbana no município de São Paulo*: Xamã, 9 ed., 271 p., 1998.

PEREIRA, E. D. et al. Estudos dos processos erosivos nas áreas urbanas e costeiras da Ilha do Maranhão – Ma In: *Simpósio Nacional de Controle de Erosão*, 7, 2001, Goiânia, Anais ... Goiânia: ABGE, cd-room, 2001.

PERIFERIA tem problemas com chuvas fortes *O IMPARCIAL*, São Luís, 04, mar., 1994, 1ª folha.

PINTO, C.S. *Curso Básico de Mecânica dos solos em 16 aulas*. 2 ed., São Paulo: Oficina de textos, 2002, 208 p.

PINTOBEIRA, E.S.; MORAIS, J.O. Comportamento hidrodinamico e sedimentológico do estuário do Rio Bacanga. *Simpósio de Geologia do Nordeste*, 9, Natal (RN), 1979, Anais...Natal: SBG, 1979, p. 135- 159.

PRANDINI, F.L. et al. Cartografia geotécnica nos planos diretores regionais e municipais In: BITAR, O.Y. *Curso de geologia aplicada ao meio ambiente* (coord.), São Paulo: ABGE, 1995, p. 187 - 202.

PREFEITURA MUNICIPAL DE SÃO LUÍS, São Luis: AEROCONSULTE, 2002, mar., Fotografia aérea, escala 1:8.000.

PRIMAVESI, A. *Manejo ecológico do solo: a agricultura e em regiões tropicais*. São Paulo: Nobel. 549 p., 1987.

RADAMBRAZI. Mapa de Geomorfologia da Folha SA 23 São Luís, escala 1:1.000.000. Rio de janeiro: MME, 1993.

REBOUÇAS A.C.; BRAGA,B.; TUNDISI, J.G. *Águas doces no Brasil:capital ecológico, uso e conservação*, São Paulo: Escrituras, 717 p.,1999.

REBOUÇAS, A.C.S. *Estudos Hidrogeológicos do Distrito Industrial de Itaqui, Maranhão*, Recife: SUDENE, 53 p., 1972.

REICHARDT, K. A água em sistemas agrícolas. São Paulo: Manole, 188 p., 1990.

RESERVATÓRIO BATATÃ fecha amanhã. *O ESTADO DO MARANHÃO*, São Luís, 18, Jan., 2003.Ano II, nº 574.

REYNOLDS, W.D.; ELRICK, D.E. A reexamination of the Constant head well permeameter method for measuring saturated hydraulic conductivity above the water table. *Soil Science*, USA, v. 136, n. 4, p. 250-268, 1983.

REYNOLDS, W.D.; ELRICK, D.E. In situ measurement of field-saturated hydraulic conductivity, sorptivity and the α -parameter using the Guelph Permeameter. *Soil Science*, USA, v. 140, n. 4, p. 292-302, 1985.

RODRIGUES, J. A. C. et al. Cartografia Geotécnica e Ambiental em Portugal, In: *Simpósio Brasileiro de Cartografia Geotécnica e Geoambiental*. 5, São Carlos (SP), 2004, Anais...São Carlos: SBCG, 2004, p.566-581.

RODRIGUES, T. L. N. et al. (Org) *Programa de Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil*: São Luís, Folha SA-23-2-A, Cururupu Folha SA-23-X-C, escala 1: 250.000, Brasília: CPRM, 1994, 185 p.

ROSSETTI, D.F. The estuarine nature of the Barreiras Formation in the Rio Capim área, northern Brazil, In: *Congresso da Associação Brasileira de Estudos do Quaternário Guarapari (ES)*, 10, Guarapari (ES), 2005, Boletim de resumo, Guarapari: ABEQUA, 2005, p.263.

SALOMÃO, F.X.T.; IWASA, O.Y. Erosão e a ocupação rural e urbana. In: BITAR, O. Y. *Curso de geologia aplicada ao meio ambiente*. São Paulo: ABGE, 1995, 247 p.

SANDERS, L. L. *A manual of field hydrology*. New Jersey: Prentice, 1998.

SELBY, M.J. *Hillslope materials and process*, 2 ed., New York: Oxford University, 1982.

SETTI, A.A. et al. *Introdução ao gerenciamento de recursos hídricos*. Brasília: ANEEL/ANA, 2001, 328 p.

SILVA et al. Avaliação de alterações do meio físico na sub-bacia hidrográfica do Ribeirão do Piçarrão. *Simpósio Brasileiro de Cartografia Geotécnica*. 4, Brasília, 2001, Anais...Brasília: ABGE, cd-rom, 2001.

SILVA, R.B.G. *Água subterrânea: um valioso recurso que requer proteção*. São Paulo: DAEE, 2004. 27 p.

SMITH, D.M. *Geology, geotechnology and investigation methodology for lateritic soils, near Worley*, W.A. Australia tropical, p. 429-439, 1985.

SOARES, P.C.; FIORI, A.P. Lógica e sistemática na análise e interpretação de fotografias aéreas em geologia. *Notícias geomorfológicas*, Campinas, v. 16, n.32, p. 71-104, 1976.

SOILMOISTURE, *Operating instructions-Model 2800 Guelph permeameter*. Santa Barbara (USA), 1987, 24 p.

SOUZA, N.C.D.C.; ZUQUETTE, L.V. Mapeamento geotécnico com base em perfis típicos de alteração para caracterização de unidades de terreno. In: *Simpósio de Geologia do Sudeste*. 2, São Paulo, 1991, Anais...São Paulo: SBG, 1991, p.345- 352.

STRAHLER, A. N. Climate and their classification. *Physical geography*, 2 ed., New York: John Wiley, p. 181-193, 1960.

SUGUIO, K. *Dicionário de geologia sedimentar e áreas afins*. Rio de Janeiro: Bertrand, 1998, 1215 p.

TER-STEPANIAM, G. Beginning of the Tectogene. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*, Paris, n. 38, p. 133-142, 1988.

TUCCI, C.E. *Hidrologia: ciência e aplicação*. 2 ed. Porto Alegre: Ed. Universidade/UFRGS/ABRH, 2001, 941 p.

VAN STEMPVOORT, D.; EWERT, L.; WASSENAAR, L. AVI: A method for groundwater protection mapping in the prairie provinces of Canadá. PPWD. Pilot Project. Set-1991-mach 1992, *Groundwater and Contaminants Project*. Environmental Sciences, Division, National Hydrology Research Institute, 1992.

VARGAS, M. Introdução à mecânica dos solos. São Paulo: McGraw-Hill/EDUSP, 509 p., 1978.

VARNES, D.J. *The logic of engineering geological and related maps. A discussion of map, units, white special references to problems presented by maps unitended for use in civil, engineering* – Professional Paper, 837, O.S. Geological Survey, 1995, 88 p. Disponível em:05.Jan.2003.

VIEIRA, L.S. *Manual da ciência do solo: com ênfase aos solos tropicais*, São Paulo: Agrônômica Ceres, 2. ed., 464 p., 1988.

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

WISCHIMEIER, W.H.; SMITH, D.D. *Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning*. Washington, DC. Department of agriculture (Agriculture handbook, 537), 1978, p.58.

ZAINE, J. E. *Mapeamento geológico-geotécnico por meio do método do detalhamento progressivo: Ensaio de aplicação na área urbana do município de Rio Claro*. 2000, 189 f. Tese de Doutorado em Geociências e Meio Ambiente, IGCE/UNESP, Rio Claro, 2000.

ZUQUETTE, L. V.; GANDOLFI N. *Cartografia geotécnica*, São Paulo: Oficina de texto, 2004, 190 p.

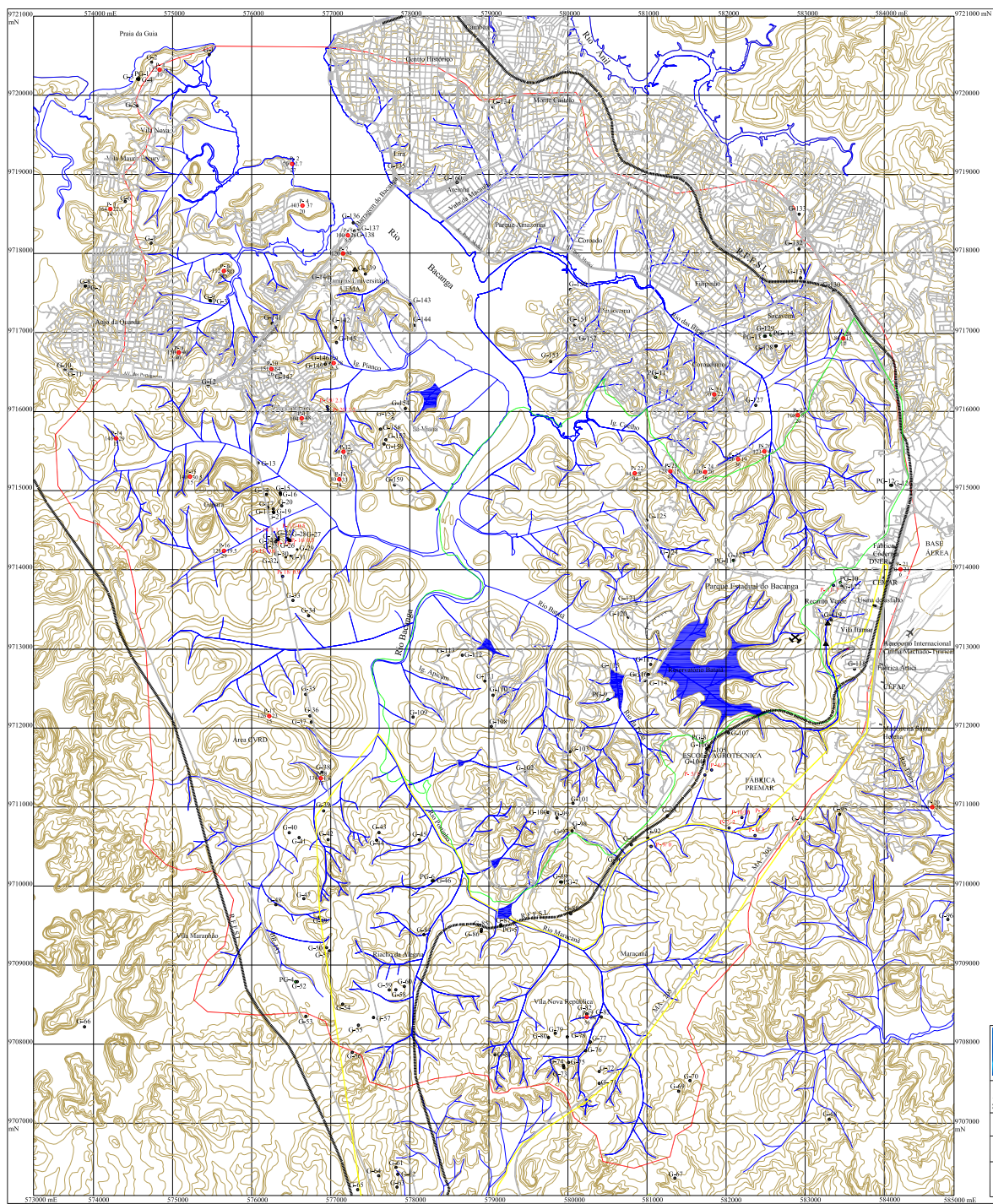
ZUQUETTE, L.V. *Análise crítica sobre cartografia geotécnica e proposta metodológica para as condições brasileiras*, 1987, v. 1, 219 f. Tese de Doutorado em Engenharia Civil Geotecnia, Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos/ USP, 1987.

ZUQUETTE, L.V. *Importância do mapeamento geotécnico no uso e ocupação do meio-físico: fundamentos e guia para elaboração*, 1993, v. 1, 256 f. Tese (Livre Docência), Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos/ USP, 1993.

ZUQUETTE, L.V. PEJON, O.J.; GANDOLFI, N.; SINELLI, O. Carta do potencial de risco à contaminação das águas subterrâneas e potencial agrícola. Região de Ribeirão Preto, SP, Brasil. *Revista Brasileira de Geociências*, São Paulo, V. 12, n.2, p. 531-540, 1993.

ZUQUETTE, L.V. PEJON, O.J.; SINELLI, O. Carta das taxas de escoamento superficial e de infiltração da região de Ribeirão Preto – SP. In: *Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. 9*, Rio de Janeiro, 1991, Anais...Rio de Janeiro: ABAS, 1991, p.566-581.

ANEXOS



CONVENÇÕES TOPOGRÁFICAS

	Drenagem
	Voçoca
	Represa
	Estrada pavimentada
	Estrada não pavimentada
	Ferrovia
	Curvas de nível (m)
	Área urbana
	Extração de laterita
	Depósito de lixo entulho
	Limite do Parque Estadual do Bacanga
	Limite da Bacia do Rio Bacanga
	Aeroporto
	Limite da APA do Maracá

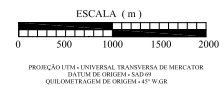
PONTOS OBSERVADOS

	Pontos estudados	P-2
	Pontos Guelph	PE-2
	Poços Tubulares	P-22
	Poços Escavados	P-4

	Nº do Poço	P-2
	Profundidade do poço (m)	Profundidade do nível estático (m)
	Vazão (m³/h)	



Mapas Base Utilizados:
 Folhas: 21, 22, 23, 29, 30, 31, 37, 38, 39
 Folha do Diagrama de Serviço Geográfico - DSG (1989)
 Escala: 1:10.000
 Fotogrametria Aérea CAEM/CA (1983) Escala 1:8.000
 Limite do Parque Estadual do Bacanga proposto por Maranhão (2002) - Área 2.634 ha

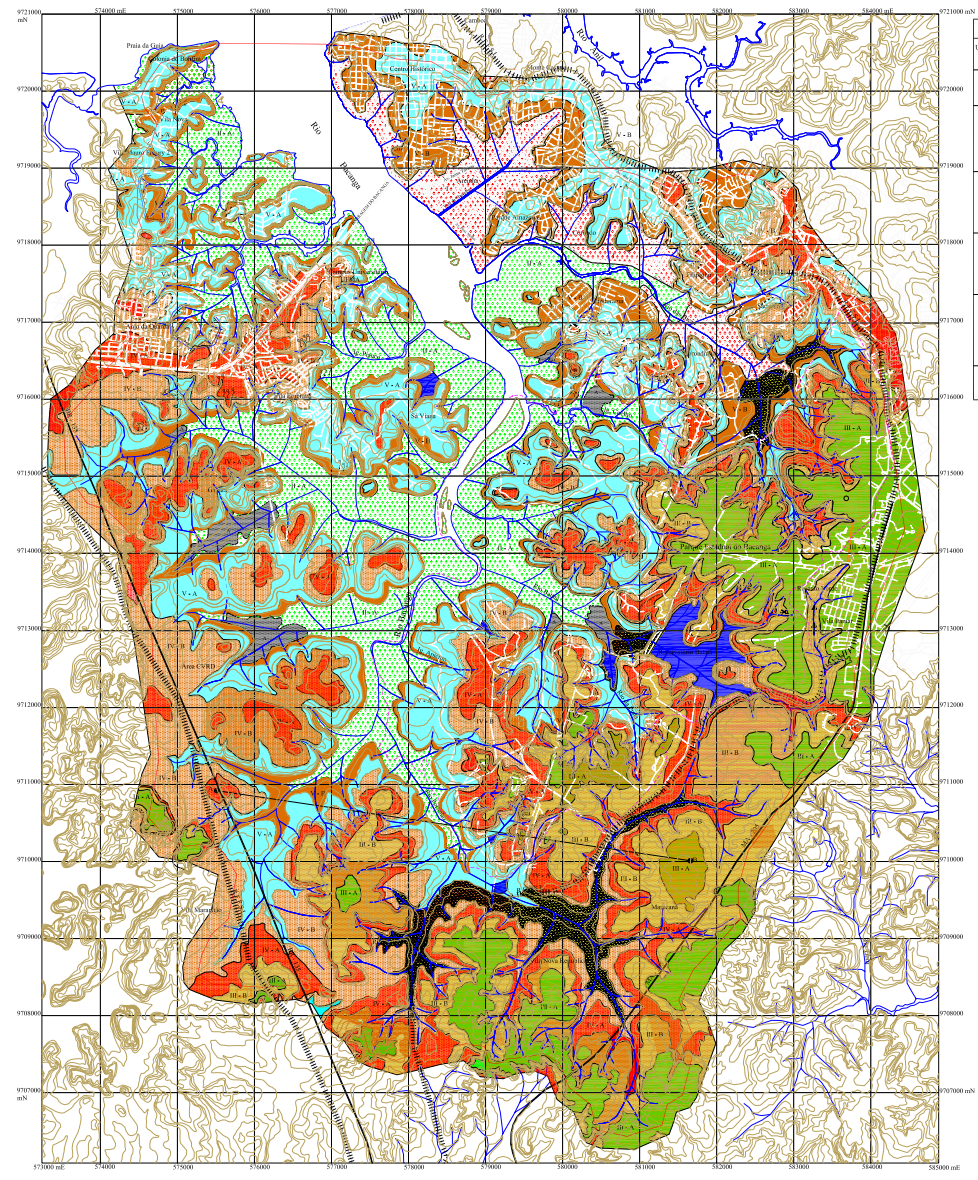


unesp UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
 "JULIO MESQUITA FILHO"
 CAMPUS RIO CLARO
 Instituto de Geociências e Ciências Exatas
 Curso de Pós-graduação em Geociências

TESE DE DOUTORADO
 AVALIAÇÃO DA VULNERABILIDADE NATURAL À CONTAMINAÇÃO DO SOLO E AQUIFERO DO RESERVATÓRIO BATATÁ - SÃO LUÍS (MA).
 Doutoranda: Ediléia Dutra Pereira
 Orientador: Prof. Dr. José Eduardo Zaine

Escala: 1:20.000 APÊNDICE A
 ETAPA GERAL

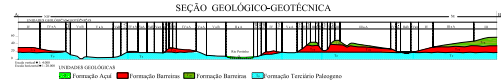
MAPA DE PONTOS DE OBSERVAÇÃO



Unidades Geológicas		Geológico - Geotécnicas					
Unidades Geológicas	Denom. Geológico	Denom. Geomorfológico	Características Mecânicas	Declividade (%)	Altitude (m)	Prof. do N.A. (m)	Problemas Geotécnicos
1	Deposito Colúvion	Faixa fluvioestuarina	Materiais de origem recente de Formação Barragem	Plan. + 2-7%	0 a 2	Exat. 0-7	Inestabilidade por erosão, deslizamentos, subsidência, etc.
11-A	Sedimentos Quaternários	Faixa fluvioestuarina	Sedimentos aluviais de origem colúvion, inconsolidados	Plan. + 2-5%	0 a 2	Exat. 0-5	Inestabilidade por erosão, deslizamentos, subsidência, etc.
13-B	Formação Barragem	Faixa fluvioestuarina	Sedimentos arenosos e argilosos, inconsolidados, de origem colúvion, de origem colúvion, de origem colúvion	Plan. + 2-5%	0 a 2	Exat. 0-5	Inestabilidade por erosão, deslizamentos, subsidência, etc.
18-A	Faixa Argila	Tabuleiro	Argila fina, arenosa e argilosa, inconsolidada, com alto teor de umidade	Plan. + 2-7% (horizontalidade)	45-80	7-25	Inestabilidade por erosão, deslizamentos, subsidência, etc.
18-B	Faixa Argila	Vertente	Sedimentos arenosos e argilosos, inconsolidados, com alto teor de umidade	Plan. + 2-7% (horizontalidade)	45-80	7-25	Inestabilidade por erosão, deslizamentos, subsidência, etc.
17-A	Faixa Arenosa	Vertente	Sedimentos arenosos e argilosos, inconsolidados, com alto teor de umidade	Plan. + 2-7% (horizontalidade)	20-30	20-40	Inestabilidade por erosão, deslizamentos, subsidência, etc.
17-B	Faixa Arenosa	Vertente	Sedimentos arenosos e argilosos, inconsolidados, com alto teor de umidade	Plan. + 2-7% (horizontalidade)	20-30	20-40	Inestabilidade por erosão, deslizamentos, subsidência, etc.
V-A	Faixa Argila	Vertente	Argila fina, arenosa e argilosa, inconsolidada, com alto teor de umidade	Plan. + 2-7% (horizontalidade)	4-10	2-40	Inestabilidade por erosão, deslizamentos, subsidência, etc.
V-B	Faixa Argila	Vertente	Argila fina, arenosa e argilosa, inconsolidada, com alto teor de umidade	Plan. + 2-7% (horizontalidade)	4-10	2-40	Inestabilidade por erosão, deslizamentos, subsidência, etc.
VI	Faixa com areia consolidada	Vertente	Argila fina, arenosa e argilosa, consolidada, com alto teor de umidade	Plan. + 2-7% (horizontalidade)	0-5	Exat. 0-5	Inestabilidade por erosão, deslizamentos, subsidência, etc.

CONVENÇÕES GEOMORFOLÓGICAS	
	Afluente com aspecto de drenagem
	Linhas de Ebbelato (apêndice geotécnico)
	Drenagem essencial
	Cone de deposição (A)
	Deposito de assoreamento
	Vogues
	Ravinas
	Solcos generalizados
	Limites de unidades geológicas/geotécnicas verificadas in situ
	Futura

CONVENÇÕES TOPOGRÁFICAS	
	Drenagem
	Drenagem verificada
	Régua
	Estado permanente
	Estado não permanente
	Fermeira
	Curvas de nível cont.
	Deposito de fluxo contínuo
	Exposição de rocha
	Limite de freguesia
	Limite do Estado do Rio de Janeiro
	Limite do Estado do Rio de Janeiro
	Aeroporto



Mapa Base 1:50000
 Folha: 24, 25, 26, 27, 28, 29
 24, 25, 26, 27, 28, 29
 Folha: 24, 25, 26, 27, 28, 29
 Escala: 1:50.000
 Instituto de Geociências e Ciências Exatas
 Curso de Pós-graduação em Geociências

ESCALA (m)
 0 500 1000 1500 2000

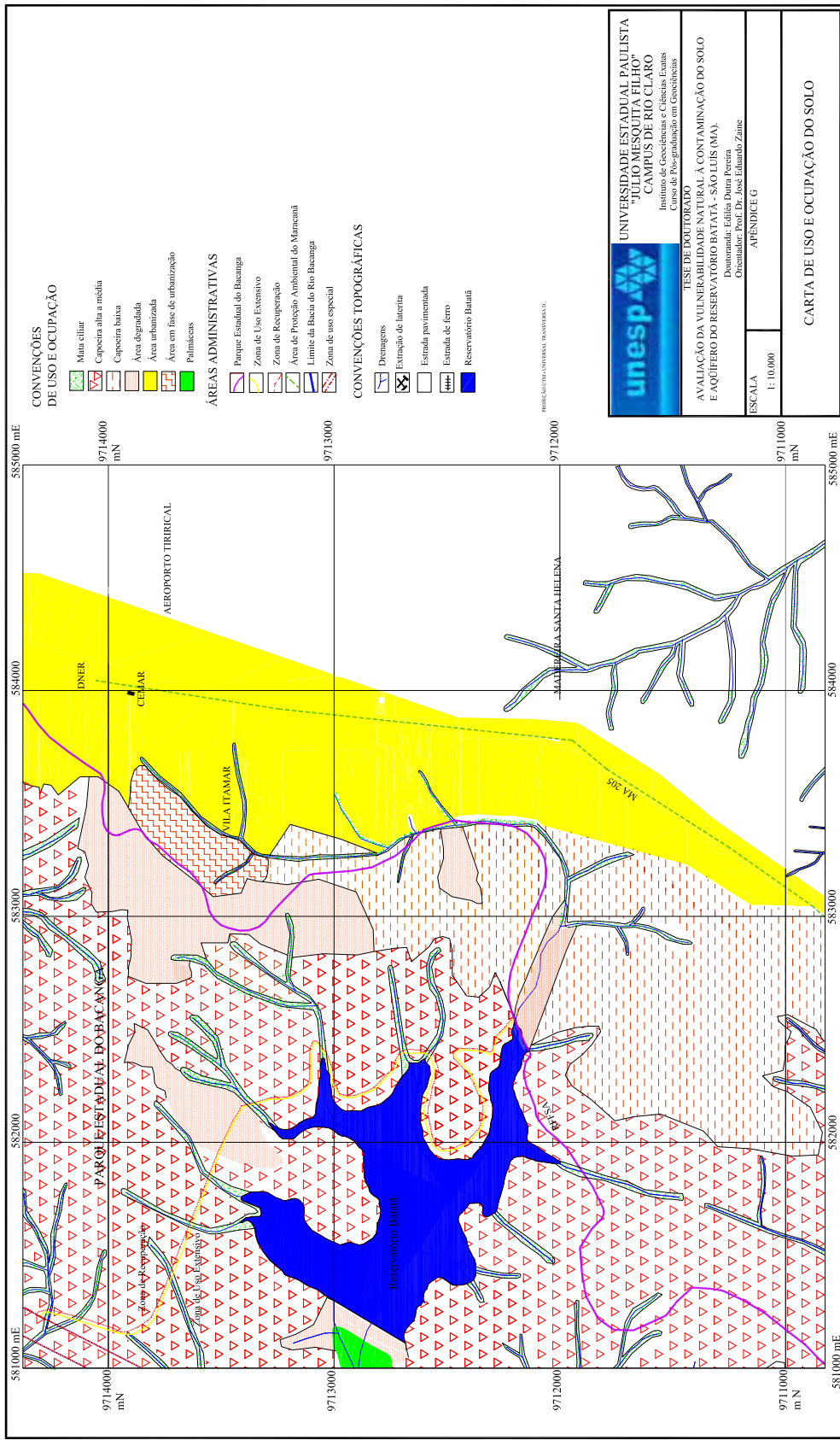
PROFESSOR RESPONSÁVEL: DR. JOSÉ CARLOS ZALME
 INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS E CIÊNCIAS EXATAS - UNESP - RUA

UNESP UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
 "JULIO MESQUITA FILHO"
 CAMPUS RIO CLARO
 Instituto de Geociências e Ciências Exatas
 Curso de Pós-graduação em Geociências

TESE DE DOUTORADO
 AVALIAÇÃO DA VULNERABILIDADE NATURAL À CONTAMINAÇÃO DO SOLO E AÇÚCERO DO RESERVATÓRIO BATATÁ - SÃO LUIS (MA)
 Doutoranda: Edilza Dutra Pereira
 Orientador: Prof. Dr. José Eduardo Zalme

Escala: 1:20.000 APÊNDICE B
 ETAPA GERAL

MAPA GEOLÓGICO-GEOTÉCNICO DA BACIA DO RIO BACANGA



CONVENÇÕES DE USO E OCUPAÇÃO

- Mata ciliar
- Capoeira alta a média
- Capoeira baixa
- Área degradada
- Área urbanizada
- Área em fase de urbanização
- Palmeiras

ÁREAS ADMINISTRATIVAS

- Parque Estadual do Bacanga
- Zona de Uso Extensivo
- Zona de Recuperação
- Área de Proteção Ambiental do Manantial
- Limite da Bacia do Rio Bacanga
- Zona de uso especial

CONVENÇÕES TOPOGRÁFICAS

- Drenagens
- Extração de inércia
- Estrada pavimentada
- Estrada de ferro
- Reservatório Batataia

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JULIO MESQUITA FILHO"
CAMPUS DE RIO CLARO
 Instituto de Geociências e Ciências Exatas
 Curso de Pós-graduação em Geociências

TESE DE DOUTORADO
AVALIAÇÃO DA VULNERABILIDADE NATURAL À CONTAMINAÇÃO DO SOLO
E AQUIFERO DO RESERVATÓRIO BATATAIA - SÃO LUÍS (MA).
 Dissertanda: Edilene Dina Pereira
 Orientadora: Profa. Dr.ª José Edumundo Zaine

ESCALA: 1: 10.000

CARTA DE USO E OCUPAÇÃO DO SOLO

PROJEÇÃO: UNIVERSAL TRANSVERSA UTM

