



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE CIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA**

CLÍSTENES TEIXEIRA BATISTA

**GEOPROCESSAMENTO APLICADO AO MAPEAMENTO GEOTÉCNICO EM
ESCALA REGIONAL – O CASO DA SERRA DE BATURITÉ, CE**

**FORTALEZA
2014**

CLÍSTENES TEIXEIRA BATISTA

**GEOPROCESSAMENTO APLICADO AO MAPEAMENTO GEOTÉCNICO EM
ESCALA REGIONAL – O CASO DA SERRA DE BATURITÉ, CE**

Tese submetida ao curso de Doutorado em Geologia do Departamento de Geologia da Universidade Federal do Ceará como parte dos requisito para obtenção do título de Doutor em Geologia. Linha de pesquisa: Geodinâmica e Recursos Minerais.

Orientador: Prof. Dr. César Ulisses Vieira Veríssimo

FORTALEZA

2014

CLÍSTENES TEIXEIRA BATISTA

GEOPROCESSAMENTO APLICADO AO MAPEAMENTO GEOTÉCNICO EM ESCALA REGIONAL – O CASO DA SERRA DE BATURITÉ, CE

Tese submetida ao curso de Doutorado em Geologia do Departamento de Geologia da Universidade Federal do Ceará como parte dos requisito para obtenção do título de Doutor em Geologia. Área de concentração: Geodinâmica e Recursos Naturais.

Aprovada em ____/____/____

MEMBROS DA BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. César Ulisses Vieira Veríssimo (Orientador)
Universidade Federal do Ceará - UFC

Prof. Dr. Ricardo Espíndola Romero
Universidade Federal do Ceará - UFC

Profº. Dra. Cynthia Romariz Duarte
Universidade Federal do Ceará - UFC

Prof. Dr. Renato Sílvio da Frota Ribeiro
Universidade Federal do Ceará - UFC

Profª. Dra. Jaqueline Pires Gonçalves Lustosa
Universidade Federal de Campina Grande - UFCG

Aos homens e mulheres trabalhadores da
Serra de Baturité.

AGRADECIMENTOS

Ao término de um ciclo de mais de seis anos na Geologia, há muitos a quem agradecer. Aos colegas do LAGETEC Jéfferson Lima, Vanusa Castelo e Daniel Dantas, e principalmente ao Paulo Thales e ao Marcelo que me ajudaram diretamente em campo e nos ensaios de laboratório. E à todos que simplesmente acompanharam de perto o desenrolar deste trabalho contribuindo com sua experiência.

Aos professores do Departamento de Geologia, em especial a César Veríssimo, mais que um geólogo competente, um professor e orientador comprometido.

Agradeço também a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo financiamento desta pesquisa e aos Laboratórios de Solos e de Mecânica de Solos da UFC pelo suporte na reta final do trabalho.

À minha família, Francisco, Maria Erimita, Ceila e Myrcea, com quem convivo há trinta anos e quem ajudaram a forjar meu caráter, e a Adriana, minha esposa, com quem convivo há muito menos e é como se fosse há muito mais.

“É raro encontrar independência de espírito ou força de caráter entre aqueles que não confiam na sua capacidade de abrir caminho pelo próprio esforço”
(Friedrich Hayek)

RESUMO

A Serra de Baturité é a região do Ceará onde é mais notória a presença de áreas de instabilidade geotécnica envolvendo movimentos de massa e erosão hídrica. As rodovias são os principais agentes deflagradores dos movimentos de massa e a ocupação de encostas nas áreas urbanas e rurais, os principais agentes promovedores da erosão acelerada, que somado às características climáticas, geomorfológicas, geológicas e pedológicas da região, concorrem para a ocorrência de movimentos de massa e perda de solos implicando em prejuízos econômicos, e por vezes, em acidentes. O zoneamento geotécnico elaborado na Serra de Baturité contou com recursos de geoprocessamento assistidos por levantamento de campo e ensaios laboratoriais para delimitar setores de maior ou menor risco geológico. Os produtos cartográficos gerados através de técnicas de processamento digital de imagens e análise espacial apresentaram resultados satisfatórios ao intuito de zonear as áreas de maior suscetibilidade geotécnica e podem servir de apoio à tomada de decisão de gestores e comunidade civil da região. Conclui-se que as ferramentas de geoprocessamento utilizadas promoveram a geração de dados indispensáveis ao mapeamento geotécnico e quando feito com o auxílio de ensaios geotécnicos laboratoriais já consagrados na literatura, a fiabilidade dos dados levantados pode atender a contento a expectativa de profissionais e pesquisadores e aumentar a disponibilidade de informações sobre o quadro geotécnico de extensas áreas em uma escala regional.

Palavras-Chave: Geotécnica, Geoprocessamento, Movimentos de Massa, Erosão Hídrica, Zoneamento.

ABSTRACT

The Baturité Mountain is the region of Ceará where it is more noticeable the presence of areas of geotechnical instability involving landslides and erosion. The highways are the main triggering agents of mass movements and the occupation of slopes in urban and rural areas, the main promoters agents of accelerated erosion, which in addition to climate, geomorphological, geological and soil characteristics of the region, contributing to the occurrence of landslides and soil loss resulting in economic losses, and sometimes in accidents. The geotechnical zoning established in the Baturité Mountain had geoprocessing resources assisted by field survey and laboratory tests to define higher or lower geological risk sectors. Cartographic products generated through techniques of digital image processing and spatial analysis showed satisfactory to the purpose of zoning the areas of greatest susceptibility geotechnical results and may serve to support the decision making of managers and civil community of the region. It is concluded that the used geoprocessing tools promoted the generation of essential data and geotechnical mapping when done with the aid of laboratory geotechnical tests already established in the literature, the reliability of the data collected can satisfactorily meet the expectations of professionals and researchers and increase the availability of information on the geotechnical box large areas on a regional scale.

Keywords: Geotechnical, GIS, Landscapes, Hydro Erosion, Zoning.

LISTA DE FIGURAS

Figura 01 – Enclaves úmidos e subúmidos do Ceará	15
Figura 02 – Classificação dos riscos ambientais	30
Figura 03 – Curvaturas das vertentes	40
Figura 04 – Cravamento de cilindro com bate-estaca manual	48
Figura 05 – Percolação de água em permeâmetro	54
Figura 06 – Permeâmetro de Carga Variável	54
Figura 07 – Nomograma de Wischmeier	57
Figura 08 – Situação Geográfica da Área de Estudo	75
Figura 09 – Regiões da Província Borborema	76
Figura 10 – Subprovíncia Borborema Setentrional	77
Figura 11 – Maciço de Baturité no contexto do Domínio Ceará Central	79
Figura 12 – Domínios Morfo-estruturais do Estado do Ceará	81
Figura 13 – Distribuição dos tipos de hidrólise na região de estudo	85
Figura 14 – Feições lineares indicando movimento dextral em gnaisse	88
Figura 15 – Xisto com veio de quartzo e fratura sub-vertical	89
Figura 16 – Contato entre paragnaisse com lente anfibolítica	90
Figura 17 – Quartzito apresentando grande densidade de juntas e fraturas	91
Figura 18 – Gnaisse com intrusões graníticas e dioríticas	92
Figura 19 – Mapa de Substrato Rochoso (Litologias)	93
Figura 20 – Diagrama de rosetas dos lineamentos	94
Figura 21 – Diagrama de rosetas dos intervalos	95
Figura 22 – Prancha 01	97
Figura 23 – Mapa de Lineamentos Estruturais	98
Figura 24 – Mapa de direção de lineamentos	99
Figura 25 – Densidade de Lineamentos (População de lineamentos por km ²)	100
Figura 26 – Densidade de Lineamentos (Comprimento dos lineamentos em km por km ²)	101
Figura 27 – Arcabouço Estrutural Regional	102
Figura 28 – Prancha 02	105
Figura 29 – Encostas quartzíticas da vertente ocidental da serra de Baturité	108
Figura 30 – Hipsometria da Serra de Baturité	109
Figura 31 – Baixas e médias declividades das colinas e planícies aluvionares	111
Figura 32 – Escarpas quartzíticas na vertente ocidental da Serra de Baturité	112
Figura 33 – Setor da vertente oriental com trechos com alta declividade	112
Figura 34 – Processos Naturais na região de Palmácia e Pacoti	113
Figura 35 – Declividade na Serra de Baturité	114
Figura 36 – Curvatura Vertical da Serra de Baturité e entorno	116
Figura 37 – Curvatura Horizontal da Serra de Baturité e entorno	117
Figura 38 – Aspecto das ocupações nas encostas urbanas na Serra de Baturité	119
Figura 39 – Trecho da CE-228 com corte em quartzito micáceo	120
Figura 40 – Cortes de estrada em setor a sotavento da Serra de Baturité	121
Figura 41 – Sistema de falhas NW-SE sub-verticais	122
Figura 42 – Orientação das Vertentes da Serra de Baturité	123
Figura 43 – Mapa de Feições do Terreno	130
Figura 44 – Pluviometria da Serra Baturité	132
Figura 45 – Erosividade na Serra de Baturité	134
Figura 46 – Classes de erosividade da Serra de Baturité no contexto regional	135

Figura 47 – Principais associações de solo da Serra Baturité	137
Figura 48 – Pontos de coleta de amostra para ensaios de erodibilidade	139
Figura 49 – Erodibilidade na região da Serra de Baturité	142
Figura 50 – Trecho de contato entre quartzito e xisto na CE-288	150
Figura 51 – Queda de blocos em estrada que liga Mulungu à Caridade	150
Figura 52 - Risco de tombamento na CE-288 de blocos de xistas	151
Figura 53 – Mapa de Suscetibilidade a Movimentos de Massa	152
Figura 54 – Mapa de Riscos ao Sistema Viário	153
Figura 55 – Erosão linear em área de cultivo temporário próximo a Mulungu	154
Figura 56 – Sulco erosivo na vertente seca da serra de Baturité	155
Figura 57 – Distribuição espacial das categorias de permeabilidade	157
Figura 58 – Proporção de Areias, Finos e Matéria Orgânica das amostras	158
Figura 59 – Mapa comparativo das erodibilidades	160
Figura 60 – Mapa de Zoneamento Geotécnico Geral	171

LISTA DE QUADROS

Quadro 01 – Tipos de Cartas Geológico-Geotécnicas	24
Quadro 02 – Atributos levantados para o mapeamento geotécnico	25
Quadro 03 – Conceitos básicos de termos ligados a riscos geológicos	28
Quadro 04 – Classificação dos movimentos de massa	31
Quadro 05 – Fatores deflagradores de movimentos de massa	37
Quadro 06 – Agentes de escorregamentos	38
Quadro 07 – Diâmetro e numeração de peneiras usadas no ensaio de granulometria	51
Quadro 08 – Classificação estrutural do solo	58
Quadro 09 – Classificação dos valores de permeabilidade	58
Quadro 10 – Fator de erodibilidade do solo	59
Quadro 11 – Classes de erosividade da chuva média anual	62
Quadro 12 – Variáveis geomorfométricas disponíveis pelo projeto TOPODATA	67
Quadro 13 – Critérios utilizados na classificação das unidades de relevo	71
Quadro 14 – Níveis hierárquicos do zoneamento das feições do relevo	73
Quadro 15 – Números gerais dos lineamentos obtidos	95
Quadro 16 – Critérios para identificação de categorias dos relevos de degradação	128
Quadro 17 – Classes de suscetibilidade a erosão laminar	140
Quadro 18 – Pesos e Influências dos fatores e classes utilizados na álgebra de mapas	147
Quadro 19 – Dados gerais da amostragem	159

SUMÁRIO

Sumário	12
1 INTRODUÇÃO	14
1.1 Considerações Gerais	14
1.2 Justificativas	16
1.3 Objetivos	18
1.3.1 Objetivo Geral	18
1.3.2 Objetivos Específicos	18
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	20
2.1 Geotécnica	20
2.1.1 Cartografia Geotécnica	21
2.1.1.1 Origens e Conceitos	21
2.1.1.2 Metodologias de Mapeamento Geotécnico	22
2.1.1.2.1 Metodologias Internacionais	22
2.1.1.2.2 Metodologias Nacionais	23
2.2 Riscos Geológicos	28
2.2.1 Classificação do Riscos Geológicos	29
2.2.2 Condicionantes de Riscos Geológicos	33
2.2.2.1 Erosão Hídrica	33
2.2.2.2 Movimentos de Massa	36
2.3 Geoprocessamento	42
2.3.1 SIG's e Análise Espacial	42
2.3.2 Sensoriamento Remoto e PDI	43
3 MATERIAIS E MÉTODOS	45
3.1 Levantamento Bibliográfico e Cartográfico	45
3.2 Etapa de Campo	46
3.2.1 Levantamento Geológico	46
3.2.2 Levantamento Geomorfológico	46
3.2.3 Levantamento de Materiais Inconsolidados	47
3.2.4 Coleta de Amostras de Solo	47
3.2.4.1 Granulometria	48
3.2.4.2 Permeabilidade	48
3.2.4.3 Matéria Orgânica	49
3.3 Etapa de Laboratório	49
3.3.1 Granulometria	49
3.3.2 Permeabilidade	52
3.3.3 Matéria Orgânica	55
3.4 Etapa de Escritório	56
3.4.1 Erodibilidade (K)	56
3.4.2 Erosividade (R)	59
3.4.3 Geoprocessamento	63
3.4.3.1 Produtos de Sensoriamento Remoto	63
3.4.3.1.1 Dados de Sensoriamento Óptico	66
3.4.3.1.2 Dados de Sensoriamento de Radar	66
3.4.3.2 Cartografia	68
3.4.3.2.1 Base Cartográfica	68

3.4.3.2.2 Cartografia Geotécnica	68
3.4.3.2.2.1 Documentos Fundamentais Básicos	69
3.4.3.2.2.2 Documentos Fundamentais de Síntese	73
3.4.3.2.2.3 Cartas Derivadas e Interpretativas	74
3.4.3.2.2.4 Cartas Analíticas Básicas	74
4 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	75
4.1 Localização e Acesso	75
4.2 Aspectos Fisiográficos	76
4.2.1 Geologia	76
4.2.2 Geomorfologia	80
4.2.3 Pedologia	83
4.2.4 Clima	85
5 PARÂMETROS E ATRIBUTOS DE MAPEAMENTO GEOTÉCNICO	88
5.1 Litologias (Substrato Rochoso)	88
5.2 Lineamentos Estruturais	94
5.2.1 Famílias	94
5.2.2 Direções	99
5.2.3 Densidade	100
5.2.4 Arcabouço Estrutural Regional	101
5.3 Morfometria	108
5.3.1 Hipsometria	108
5.3.2 Declividade	110
5.3.3 Formas das Encostas	115
5.3.4 Orientação das Vertentes	118
5.3.5 Hierarquização Geomorfológica	124
5.3.6 Feições do Terreno	126
5.4 Pluviosidade	131
5.4.1 Erosividade	133
5.5 Associação de Solos	136
5.5.1 Erodibilidade	138
5.5.1.1 Erodibilidade com base na literatura	140
5.5.1.2 Erodibilidade por amostragem	143
5.5.1.2.1 Granulometria	143
5.5.1.2.2 Matéria Orgânica	143
5.5.1.2.3 Permeabilidade	144
6 RESULTADOS - MOVIMENTOS DE MASSA E EROSÃO	146
7.1 Movimentos de Massa	146
7.2 Erosão	154
7 ZONEAMENTO GEOTÉCNICO GERAL	161
8 CONCLUSÕES	172
9 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	174
ANEXO	189

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações Gerais

A região que constitui o objeto de pesquisa deste trabalho – a Serra de Baturité – constitui uma paisagem de exceção do sertão semiárido cearense. Essas paisagens de exceção são enclaves subúmidos caracterizadas, via de regra, por superfícies topograficamente elevadas de relevos serranos com dimensões variadas e que são submetidos às influências de mesoclimas de altitude (Ab'Sáber, 1970, 1974 *apud* Souza e Oliveira, 2006).

No estado do Ceará, os enclaves subúmidos são compostos pelas serras da Meruoca, Uruburetama e Baturité, pelo planalto da Ibiapaba, chapada do Araripe, além das elevações topográficas que ocorrem na Região Metropolitana de Fortaleza (RMF), como as serras de Aratanha, Maranguape e Conceição. (Souza e Oliveira, *op. cit.*) (Figura 01).

A Serra de Baturité apresenta características naturais bastante distintas de seu entorno semiárido. Possui orientação predominante NNE - SSW, com níveis altimétricos que alcançam de 600 a 800 m, em média. Excepcionalmente, alguns níveis de cristas superam a cota de 900 m e atingem até 1.114 m, o caso o Pico Alto, no município de Pacoti (Souza e Oliveira, *op. cit.*).

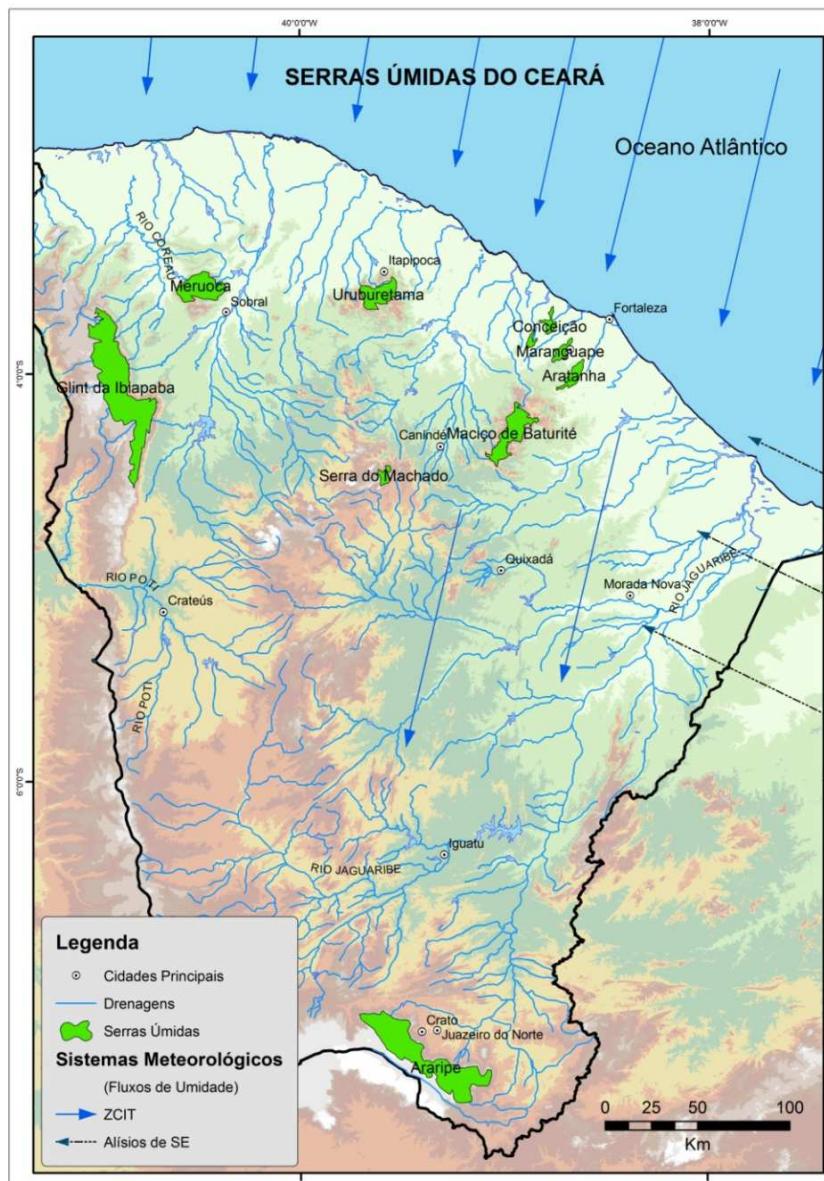
Além das diferenças topográficas e geomorfológicas, destacam-se as particularidades do clima e da vegetação dessa região. As altitudes topográficas da Serra de Baturité favoreceram a instalação de um clima mais ameno que o semiárido sertanejo e vegetação com características de floresta tropical úmida, remanescente da Mata Atlântica (IBAMA, 2002).

Essas distinções de paisagens promoveram formas de uso e ocupação do solo e estruturas urbanas também diferenciadas em relação à depressão sertaneja. Enquanto no semiárido predominou a ocupação através da pecuária extensiva e cultura de algodão, na Serra de Baturité, desde o início de sua ocupação, suas potencialidades agrícolas para a produção de café e cana-de-açúcar foram exploradas (IBAMA, *op.cit.*).

Nas últimas décadas, a ocupação da Serra de Baturité tem sido revigorada a reboque de suas potencialidades paisagísticas e turísticas, com a construção de hotéis, pousadas e casas de veraneio. Muitas dessas novas

edificações foram inclusive erguidas em áreas inadequadas ambiental e legalmente, como em encostas muito íngremes, em topos de morros ou muito próximas às margens dos rios.

Figura 01 – Enclaves úmidos e subúmidos do Ceará.



Fonte: Modificado de Souza e Oliveira, 2006.

É notória a necessidade de se conhecer melhor as condições geotécnicas da Serra de Baturité como uma forma de promover maior equilíbrio e segurança do meio físico frente às solicitações antrópicas.

Para o adequado zoneamento ambiental e geotécnico é imprescindível o conhecimento dos atributos do meio físico, como rochas, materiais inconsolidados, relevo, águas, condições climáticas, etc.

O conhecimento do meio físico é obtido através de um processo de mapeamento onde o comportamento dos seus atributos é avaliado em conjunto a fim de se definir critérios de suscetibilidade, vulnerabilidade, predisposição e adequabilidade do terreno às diferentes formas de ocupação com o suporte de documentos técnicos como as cartas de zoneamento ambiental e as cartas geotécnicas.

Nesse contexto, várias propostas metodológicas de estudo e mapeamento geotécnico foram desenvolvidas por instituições nacionais como IPT (Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo) e a EESC/USP (Escola de Engenharia de São Carlos/ USP).

Tais metodologias, que incluem a elaboração de diversos produtos como cartas de suscetibilidade à erosão e à movimentos de massa, cartas de condições geotécnicas, entre outras, foram inspiradas em experiências metodológicas de escolas estrangeiras desenvolvidas ao longo do século XX e adaptadas à realidade brasileira e às suas condições naturais.

1.2 Justificativas

A Serra de Baturité não apresenta altas taxas de densidade demográfica e de pluviosidade, como é o caso da Serra do Mar, em São Paulo e da região serrana do Rio de Janeiro, onde os índices de pluviosidade chegam a 5.000 mm/ano e a densidade demográfica é superior a 800 hab./km², enquanto na Serra de Baturité a pluviosidade atinge o máximo de 1.500mm/ano e a densidade demográfica dos municípios da região é da ordem de 100 hab./km² (Bastos, 2012).

No entanto, é a região do Ceará onde é mais notória a presença de áreas de instabilidade geotécnica e, no contexto demográfico e natural do Ceará, é sem dúvida, a região do estado que apresenta maior predisposição a eventos ligados a movimentos de massa. Essa instabilidade está associada principalmente à presença de rodovias e estradas e à ocupação de encostas nas áreas urbanas e rurais.

Segundo Bastos (2012), na Serra de Baturité as rodovias são os principais agentes deflagradores de movimentos de massa, estando a maior parte

das ocorrências de cicatrizes de deslizamento associadas à presença de cortes promovidos pela abertura de estradas e rodovias.

Quando os cortes de rodovias e estradas são feitos no mesmo sentido das falhas e fraturas das rochas que compõem as encostas e o ângulo do mergulho dessas descontinuidades é concordante com o cimento da vertente, têm-se condições muito suscetíveis à movimentos de massa.

A ocorrência de movimentos de massa deflagrados pelos cortes de rodovia é mais notória na CE-065, que liga Fortaleza à Pacoti através de Palmácia, no setor norte da serra, no entanto, em praticamente todas as rodovias da região, eventos de diferentes tipos de movimentos de massa ocorrem ou estão claramente presentes os riscos de sua ocorrência em diversos trechos.

Não se pode negligenciar também a dimensão dos processos de erosão promovidos principalmente pelas atividades agrícolas na Serra de Baturité. A persistência de aplicação de técnicas agrícolas rudimentares em encostas e fundo de vales, onde a retirada da cobertura vegetal e o cultivo em áreas de maior declividade leva à maior exposição dos solos ao poder erosivo das chuvas.

Esses eventos fazem inclusive, parte da dinâmica morfogenética atuante na esculturação do relevo na região, que incluem ainda, processos erosivos cada vez mais intensos influenciados em parte, pela ocupação antrópica na área de estudo.

Essa ocupação acarreta também no incremento e adensamento cada vez maior da malha viária através da abertura de estradas e rodovias, que é um dos fatores cruciais para a deflagração de movimentos de massa e aceleração da erosão na Serra de Baturité.

Fora dos perímetros urbanos, a agricultura corresponde a uma atividade de grande potencial deflagrador dos processos erosivos, principalmente quando praticada nos terrenos de maior declividade e onde a adoção de práticas rudimentares é mais utilizada.

Todos esses fatores são agravados pela ingerência do poder público, seja na construção inadequada de rodovias ou nas áreas de maior risco de inundação e deslizamento em áreas urbanas, cuja ocupação deveria ser evitada.

Esse estudo tem como fundamento o enfoque no geoprocessamento para a elaboração do zoneamento geotécnico na região da Serra de Baturité. As principais técnicas utilizadas são a aplicação de filtragem espectral em imagens de

satélite para a obtenção de dados primários e tratamento dos mesmos e a álgebra de mapas para a geração dos produtos cartográficos conclusivos.

A hipótese levantada é que essas técnicas atendem a contento a expectativa de obtenção e geração de informações geoespaciais necessárias para o mapeamento geotécnico em escala regional. No entanto, é preciso estar ciente que mesmo em se tratando de um mapeamento regional e orientativo, a verificação e validação dos dados obtidos através do geoprocessamento deve ser feita com o levantamento de campo e em ensaios laboratoriais.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo Geral

O objetivo principal deste trabalho é a elaboração do mapeamento geotécnico na Serra de Baturité, com a delimitação de zonas hierárquicas de risco geotécnico, fundamentadas em técnicas atuais de geoprocessamento.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Avaliar os riscos de processos erosivos e levantamento de informações estruturais para a avaliação de riscos de movimentos de massa na região de estudo com base em análise espacial e processamento digital de imagens orbitais, como suporte aos ensaios geotécnicos de laboratório e métodos indiretos de investigação geotécnica.
- Identificar as unidades geotécnicas através da sobreposição e soma de fatores deflagradores de movimentos de massa e erosão hídrica na região de estudo;
- Elaborar um conjunto de documentos cartográficos e escritos que sirvam de suporte técnico para a tomada de decisão dos agentes públicos e comunidade civil;
- Avaliar a fiabilidade da aplicação das técnicas de sensoriamento remoto e geoprocessamento para o mapeamento geotécnico em escala regional.

- Comparar taxas de erodibilidade disponíveis na literatura para as classes de solo que ocorrem na região de estudo com os valores obtidos em amostras de solo, bem como a validade de métodos indiretos consagrados de cálculo de erodibilidade.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo serão abordadas as questões conceituais e teóricas dos temas centrais que trata este trabalho: a geotécnica, envolvendo a cartografia geotécnica e suas metodologias de mapeamento, os riscos geológicos, em particular, os riscos geológicos exógenos e as principais técnicas de análise espacial e processamento digital de imagens (PDI) utilizadas neste trabalho de zoneamento geotécnico.

2.1 Geotécnica

A Geotécnica é um ramo do conhecimento que consiste numa interface entre a Geologia e a Engenharia. Trata do estudo das propriedades dos solos e das rochas em função das construções civis, considerando as interações entre essas e o meio ambiente e tendo como objetivo fundamental o desenvolvimento de diagnósticos ambientais envolvendo riscos geológicos.

A elaboração de prognósticos preventivos e planejamento territorial de áreas suscetíveis a riscos geotécnicos bem como a definição de medidas mitigadoras ou reparadores de áreas afetadas por acidentes geológicos constituem também as características de um estudo geotécnico.

Pode-se dividir a Geotécnica em três áreas do conhecimento: a Geologia de Engenharia, a Mecânica dos Solos e a Mecânica das Rochas (Polivanov & Barroso, 2011).

Neste contexto, segundo Oliveira (1986) *apud* Da Costa (2007), cabe à Geologia de Engenharia explicar a gênese dos terrenos, fazer a sua descrição qualitativa e a sua caracterização quantitativa, tendo em conta os problemas de engenharia a resolver e os impactos ambientais por eles criados.

Esse processo é possível através do reconhecimento geológico, da prospecção geofísica e mecânica e dos ensaios de campo e de laboratório para determinar as propriedades mecânicas dos solos e das rochas.

Enquanto isso cabe à Mecânica dos Solos e à Mecânica das Rochas as tarefas de análise da estabilidade dos terrenos sempre tendo em vista que são frequentes as situações onde as rochas e os solos estão simultaneamente envolvidos ou apresentam comportamentos intermediários.

No entanto, é possível discriminar algumas particularidades entre essas disciplinas. De acordo com Rocha (1981), a Mecânica das Rochas debruça-se sobre o conhecimento dos maciços rochosos em termos de deformabilidade, resistência e tensão.

Por sua vez, segundo Mineiro (1981), a Mecânica dos Solos trata do equilíbrio dos maciços terrosos sob a ação de solicitações exteriores, da resistência ao corte dos solos submetidos a esforços tangenciais de escoamento em meios porosos, da consolidação e da compressibilidade dos solos, do cálculo de estabilidade de taludes naturais e de aterro e do comportamento dos solos sob solicitações dinâmicas (sísmicas).

2.1.1 Cartografia Geotécnica

2.1.1.1 Origens e Conceitos

As primeiras cartas geotécnicas, destinadas ao planejamento regional e urbano, datam do início do século XX, mas só depois da II Guerra Mundial, devido a necessidade de reconstrução das cidades, ocorreu o desenvolvimento de metodologias sistemáticas (Franco et. al., 2010).

Em 1968, a IAEG (*International Association of Engineering Geology*) propôs a criação da *Engineering Geological Mapping Comission* para desenvolver estudos que permitissem regulamentar a elaboração de mapeamentos geotécnicos e seus produtos, bem como difundir conhecimentos e tendências.

No Brasil, a partir da década de 80, houve um aumento considerável da produção científica relacionada à cartografia geotécnica que resultou no aparecimento de grupos de pesquisas sobre o assunto, em especial o IPT (Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo), o Departamento de Geotecnia da Escola de Engenharia de São Carlos (USP) e o Instituto de Geociências da Universidade Federal do Rio de Janeiro (Franco, *op. cit.*).

Zuquette e Gandolfi (2004) afirmam que os termos cartografia e mapeamento geotécnico são encontrados muitas vezes como similares, em função da influência de duas correntes de trabalho distintas: a da língua francesa, derivada do termo *Cartographie Geotechnique* e a da língua inglesa, *Engineering Geological Mapping*.

Zuquette (1987) conceitua mapeamento geotécnico como o conjunto de processos que busca analisar e avaliar os atributos do meio físico, assim como o seu comportamento frente às várias formas de ocupação, visando orientar o planejamento, ocupação, manejo e conservação de determinada porção do espaço, de forma a auxiliar na mitigação de problemas em curso e na prevenção de problemas futuros.

Prandini *et al.* (1995) ressaltam que as cartas geotécnicas são a "expressão prática do conhecimento geológico aplicado ao enfrentamento de problemas postos pelo uso e ocupação do solo", tendo nesse contexto como objetivos, rever o desempenho da interação entre a ocupação e o meio físico, bem como os próprios conflitos entre as diversas formas de uso territorial e orientar medidas preventivas e corretivas no sentido de minimizar deseconomias e riscos nos empreendimentos de uso do solo.

2.1.1.2 Metodologias de Mapeamento Geotécnico

Segundo Zuquette e Nakazawa (1998), nas décadas de 40 e 50 ocorreu a fase mais criativa no desenvolvimento de mapas e cartas geotécnicos, e na segunda metade da década de 60 e nos anos 70 houve uma proliferação de trabalhos relacionados ao tema. Em decorrência desse desenvolvimento, existem atualmente, várias metodologias de elaboração de Cartas Geológico-Geotécnicas.

2.1.1.2.1 Metodologias Internacionais

As principais metodologias internacionais são as elaborada pela IAEG (*International Association of Engineering Geology*), a sistemática ZERMOS e a metodologia PUCE.

A IAEG iniciou seus trabalhos em 1968 com o objetivo de formular uma orientação de mapeamento que fosse viável para ser desenvolvida e utilizada na maioria dos países, considerando tanto os aspectos sócio-econômicos, como os técnicos. Como principais fatores considerados, consta o caráter das rochas e dos solos, as condições hidrogeológicas geomorfológicas e os fenômenos geodinâmicos.

A sistemática ZERMOS (Zonas Expostas aos Riscos de Movimentos de Solos) foi elaborada na França no início da década de 70, sendo utilizada pelo Serviço Geológico da França.

Esta metodologia tem como objetivo principal fornecer informações sobre uma área quanto às condições de instabilidades potenciais e/ou reais, em relação à movimentos de massa, erosão, abatimentos e sismos.

A metodologia PUCE (Patterns, Units, Components, Evaluations) foi desenvolvida na Austrália, na década de 50 e tem como objetivo, racionalizar procedimentos de coleta e processamento de informação de engenharia por estágios de planejamento e projeto de obras civis (Miranda, 2005).

2.1.1.2.2 Metodologias Nacionais

Foram o IPT (Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo) e a EESC/USP (Escola de Engenharia de São Carlos/ USP - Depto. de Geotecnica) que desenvolveram as duas principais metodologias de cartografia geotécnica no Brasil.

A Sistemática do IPT foi proposta por Prandini *et al.* (1995). Elaborada a partir de trabalhos específicos realizados pela Divisão de Geologia do IPT em algumas cidades brasileiras, possui a finalidade de resolver problemas relacionados ao meio físico.

Essa metodologia busca otimizar as relações entre os esforços de investigação, a qualidade e a utilidade da informação obtida (Zuquette & Nakazawa, 1998).

Para Prandini *et al* (1995), a cartografia geotécnica pode ser apresentada com diferentes designações, conforme a finalidade e a natureza do terreno. Assim, são definidos quatro tipos principais de cartas geotécnicas e seus respectivos conceitos, conforme sua finalidade (Quadro 1).

A sistemática EESC/USP foi proposta por Zuquette (1987) e atualizada por Zuquette e Gandolfi (2004), trabalhos nos quais são feitas análises críticas da cartografia e do mapeamento geotécnico, além de apresentar uma proposta metodológica de elaboração de Cartas Geológico-Geotécnicas (Proin/Capes & Unesp/IGCE, 1999). É a proposta metodológica adotada neste trabalho.

Quadro 01 – Tipos de Cartas Geológico-Geotécnicas

CARTAS GEOTÉCNICAS (PROPRIAMENTE DITAS)	Expõem as limitações e potencialidades dos terrenos, estabelecendo as diretrizes de ocupação, frente às formas de uso do solo.
CARTAS DE ATRIBUTOS	Apresentam a distribuição geográfica de características de interesse (atributos, parâmetros geotécnicos) a uma ou mais formas de uso e ocupação do solo.
CARTAS DE RISCOS GEOLÓGICOS	Preponderam a avaliação de dano potencial à ocupação, frente a uma ou mais características ou fenômenos naturais ou induzidos pelo uso do solo.
CARTAS DE SUSCETIBILIDADE	Informam sobre a possibilidade de ocorrência de um ou mais fenômenos geológicos e de comportamentos indesejáveis, pressupondo uma dada forma de uso do solo.

Fonte: Prandini *et al* (1995)

O objetivo dessa sistemática é estudar e analisar o meio físico e suas relações a partir da avaliação de seus atributos, com a finalidade de elaborar documentos cartográficos que se apliquem ao planejamento de ocupação de uma determinada área ou região.

Atributos são as qualidades pertinentes aos componentes do meio ambiente e que são utilizadas para caracterizá-las, podendo ser obtidas através de trabalhos de campo, amostragens, sondagens, ensaios e análises laboratoriais sobre amostras, fotointerpretação, registros e estimativas (Souza, 2004).

Os atributos utilizados em mapeamento geotécnico são elencados segundo o componente do meio ambiente a eles associados, seja meio físico, biótico ou antrópico.

O que se constata é que o elenco de atributos do meio ambiente em cada trabalho de mapeamento geotécnico pode variar em decorrência da disponibilidade de recursos técnicos e financeiros, das particularidades da área estudada e da escala do trabalho. O quadro 02 mostra os principais atributos levantados e seus respectivos componentes ambientais no mapeamento geotécnico segundo o método da EESC/USP.

A metodologia da EESC/USP preconiza também a hierarquização dos documentos cartográficos em categorias de acordo com a escala e o grau de detalhamento. Os documentos de cada nível hierárquico estão sempre condicionados aos níveis inferiores e a um conjunto de atributos.

A hierarquização proposta por Zuquette e Gandolfi (2004) permite orientar a elaboração dos documentos cartográficos numa sequência lógica. Segundo os autores, é preciso observar “as relações existentes entre os componentes do meio ambiente em cada nível hierárquico” onde cada um desses níveis demanda um número de atributos e um tratamento prévio.

Quadro 02 – Atributos levantados para o mapeamento geotécnico e avaliação de riscos geológicos na Serra de Baturité.

COMPONENTES AMBIENTAIS	ATRIBUTOS
SUBSTRATO ROCOSO	Litologia
	Mineralogia
	Distribuição
	Estruturas (falhas e fraturas)
MATERIAIS INCONSOLIDADOS	Distribuição
	Textura
	Erodibilidade
	Permeabilidade
	Matéria Orgânica
GEOMORFOLOGIA	Amplitude de relevo
	Declividade
	Orientação das vertentes (aspecto)
	<i>Landforms</i> (feições do terreno)
	Curvaturas das vertentes (vertical e horizontal)
CLIMA	Pluviosidade
	Erosividade

Fonte: Elaborado pelo autor

A hierarquização proposta nesse método pode ser exposta da seguinte forma:

- Nível Hierárquico I: Fundamental Básico – registra as características dos componentes dos meios físico, biológico e antrópico por meio da variação espacial dos atributos. A obtenção dos atributos e a produção dos documentos podem ser feitas por diferentes procedimentos e métodos.

- Exemplos de Documentos: Mapas de Substrato Rochoso, Topografia, Declividade, Feições do Terreno, Bacias Hidrográficas, Materiais Inconsolidados, Climático, Vegetação, Densidade Populacional.

- Nível Hierárquico II: Fundamental de Síntese – elaborado com o objetivo de sintetizar as informações de uma região sem, no entanto, propiciar análises para fins específicos. Representar as informações em um único documento (após uma seleção dos atributos). As escalas pequenas são as mais indicadas (1:100.000).

- Exemplo de Documentos: Carta de zoneamento geotécnico geral (CZGG), mapa das condições geológico-geotécnicas, carta de restrições.

- Nível Hierárquico III: Carta derivada e interpretativa – produzida para uma condição pré-definida; reflete o resultado de uma análise, considerando as características de cada divisão da área em questão. Cada unidade delimitada neste documento é classificada quanto ao comportamento natural do meio diante de uma determinada situação de uso. Considerando as variações espaciais, pode-se produzir CZGE (Carta de zoneamento geotécnico específico). O objetivo é delimitar unidades que apresentem níveis de heterogeneidade mínimos, compatíveis com a escala do trabalho. Podem ser utilizados recursos como matrizes bidimensional e tridimensional, árvore lógica, sobreposição controlada, métodos estatísticos ou determinísticos, etc.

- Exemplos de Documentos: Cartas para fundações, drenabilidade, escavabilidade, erodibilidade, erosividade, potencial agrícola, potencial para minerais e materiais para construção civil, índices socioeconômicos, etc.

- Nível Hierárquico IV: Carta analítica básica – elaborada com base em um conjunto de informações sobre componentes básicos de um meio, normalmente relacionados à probabilidade (absoluta ou relativa) de

ocorrência de um ou mais processos naturais. São cartas elaboradas a partir dos documentos anteriores.

- Exemplos de Documentos: Cartas de probabilidade de ocorrência de eventos naturais, de áreas degradadas, de passivos ambientais, de potencial de erosão, etc.

- Nível Hierárquico V: Carta de prognósticos de riscos, de problemas e limitações – montada considerando a interação de características dos componentes do meio ambiente. Produzidas a partir da análise das anteriores.

- Exemplos de Documentos: Cartas de classificação de bacias hidrográficas quanto a problemas ambientais, vulnerabilidade das águas, zoneamento geoambiental, riscos específicos e totais, restrições para um tipo de ocupação específico, etc.

- Nível Hierárquico VI: Carta de procedimento – leva em conta a ocupação e o controle dos riscos. Considera as vantagens e limitações das diferentes zonas.

- Exemplos de Documentos: Carta que retrata os procedimentos construtivos e os cuidados para implementar as formas de ocupação.

- Nível Hierárquico VII: Carta de viabilidade (potencial) para os usuários – deve ter como base todas as informações do meio ambiente, considerando as relações entre os diferentes vetores de ocupação. Aspectos do meio ambiente, fatores socioeconômicos e antrópicos devem ser considerados em documentos para escalas desde 1:50.000 até 1:2.000.

- Exemplos de Documentos: Cartas viabilidade para aeroportos, barragens e captação de água, agropecuária e hortifrutigranjeiro, parques industriais, aterros sanitários, construções de residências, obras enterradas.

- Nível Hierárquico VIII: Carta de orientações conclusivas – tem como objetivo permitir tomadas de decisões administrativas ou econômicas. Baseia-se nos documentos das fases anteriores e estudos das demandas futuras quanto ao vetor considerado (ocupação urbana, água, etc.)

- Exemplos de Documentos: Hierarquização das unidades considerando somente os atributos do meio físico, priorização das áreas para diferentes finalidades (global ou específica).

2.2 Riscos Geológicos

Risco Geológico pode ser definido como "*situação de perigo, perda ou dano, ao Homem e suas propriedades, em razão da possibilidade de ocorrência de processos geológicos, induzidos ou não*" (Cerri, 1993).

A análise de risco (ou avaliação de risco, como preferem alguns autores) tem a finalidade de quantificar a possibilidade de ocorrência de um evento natural perigoso e as consequências socioeconômicas adversas causadas pelo mesmo (Miranda, 2011).

Nesse sentido, a equação básica para a avaliação de risco é:

$$R = P \times C$$

(RISCO = Possibilidade de ocorrência x Consequências)

Devido ao uso divergente de alguns termos empregados na Geotécnica pelos profissionais e pesquisadores que trabalham na área, faz-se necessário uma discriminação conceitual de alguns termos ligados aos riscos geológicos adotados pelo Instituto de Pesquisa Tecnológicas (IPT) e utilizados nesta pesquisa:

Quadro 03 – Conceitos básicos de termos ligados a riscos geológicos

EVENTO
Fenômeno com características, dimensões e localização geográfica registrada no tempo, sem causar danos econômicos e/ou sociais.
PERIGO (HAZARD)
Condição ou fenômeno com potencial para causar uma consequência desagradável.
VULNERABILIDADE
Grau de perda para um dado elemento, grupo ou comunidade dentro de uma determinada área passível de ser afetada por um fenômeno ou processo.

SUSCETIBILIDADE
Indica a potencialidade de ocorrência de processos naturais e induzidos em uma dada área, expressando-se segundo classes de probabilidade de ocorrência.
RISCO
Relação entre a possibilidade de ocorrência de um dado processo ou fenômeno, e a magnitude de danos ou consequências sociais e/ou econômicas sobre um dado elemento, grupo ou comunidade. Quanto maior a vulnerabilidade, maior o risco.
AREA DE RISCO
Área passível de ser atingida por fenômenos ou processos naturais e/ou induzidos que causem efeito adverso. As pessoas que habitam essas áreas estão sujeitas a danos a integridade física, perdas materiais e patrimoniais.

Fonte: IPT (2007)

2.2.1 Classificação dos Riscos Geológicos

Os processos naturais desencadeadores dos riscos geológicos servem de base para classificação e discriminação dos mesmos. Cerri (1993) apresenta um sistema de classificação de risco onde a concepção de risco ambiental engloba todos os tipos de risco, que são divididos em riscos tecnológicos, sociais e naturais.

Os riscos naturais são subdivididos, de acordo com o processo desencadeador, em físicos e biológicos. Os riscos físicos se subdividem em atmosféricos, geológicos e hidrológicos (Figura 02).

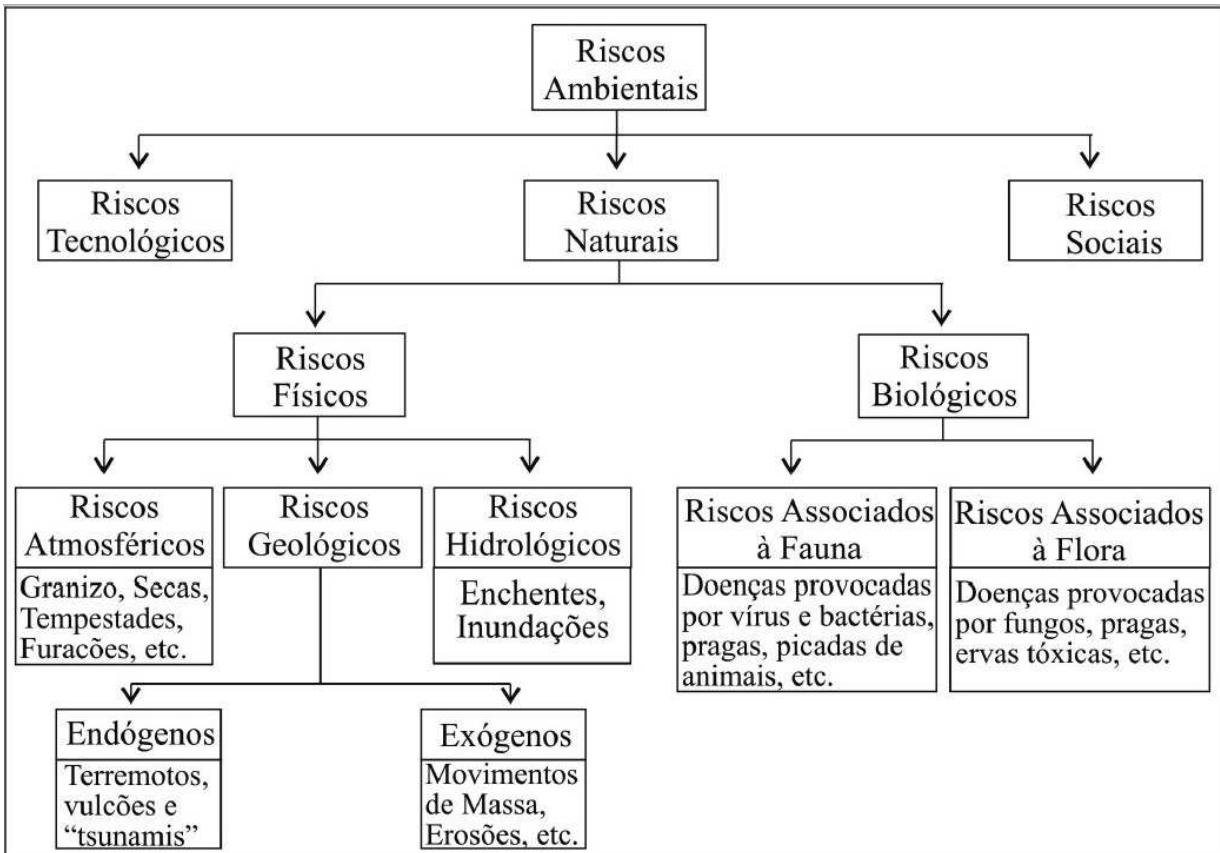
Os riscos geológicos são associados aos processos que podem estar relacionados predominantemente à geodinâmica interna ou externa. Nesse sentido, surge a divisão dos riscos geológicos, em riscos endógenos (terremotos, atividades vulcânicas, "tsunamis"), associados à geodinâmica interna; e riscos exógenos (movimentos de massa, erosão), associados à geodinâmica externa.

Cabe ainda na classificação de riscos geológicos exógenos, os riscos associados a determinadas litologias, como as subsidências e colapsos de solo em terrenos cársticos e a instabilidade em áreas de solos argilosos expansivos.

Devido às características geoambientais da área de pesquisa deste trabalho e ao propósito do mesmo, serão focalizados aqui os riscos geológicos exógenos relacionados à erosão hídrica pluvial e aos movimentos de massa, no

entanto, o mapeamento geotécnico contemplará também a suscetibilidade a inundações e assoreamentos.

Figura 02 – Classificação dos riscos ambientais



Fonte: Cerri (1993)

Os movimentos de massa são classificados de diferentes maneiras, segundo diversos autores. Segundo Selby (1993) *apud* Florenzano (2008), os critérios utilizados nas diferenciações desses processos são: o tipo de material mobilizado, a velocidade e o mecanismo do movimento, o modo de deformação, a geometria da massa deformada e o conteúdo de água.

Entre as diferentes classificações, destacam-se as de Carson e Kirkby (1972), Varnes (1978) e Sassa (1989). No Brasil, destacam-se as classificações Guidicini e Nieble (1984) e IPT (1981). (Florenzano, *op cit*).

Augusto Filho (1992) apresenta uma classificação muito conveniente para a realidade brasileira dividida em rastejo, escorregamento, quedas e corridas, como mostra o Quadro 04.

Quadro 04 – Classificação dos movimentos de massa

PROCESSOS	CARACTERÍSTICAS DO MOVIMENTO, MATERIAL E GEOMETRIA
Rastejo ou Fluênci a	Vários planos de deslocamento (internos) Velocidade de muito baixa (cm/ano) a baixas e decrescentes com a profundidade Movimentos constantes, sazonais ou intermitentes Solo, depósitos, rocha alterada e /ou fraturada Geometria indefinida
Escorregamentos	Poucos planos de deslocamento (externos) Velocidades de média (km/h) a altas (m/s) Pequenos a grandes volumes de material Geometria e materiais variáveis Planares – solos poucos espessos, solos e rochas com um plano de fraqueza Circulares – solos espessos homogêneos e rochas muito fraturadas Em cunha – solos e rochas com dois planos de fraqueza
Quedas	Sem planos de deslocamento Movimentos tipo queda livre ou em plano inclinado Velocidades muito altas (vários m/s) Material rochoso Pequenos a médios volumes Geometria variável: lascas, placas, blocos, etc. Rolamento de matacão Tombamento
Corridas	Muitas superfícies de deslocamento (internas e externas à massa em movimentação) Movimento semelhante ao de um líquido viscoso Desenvolvimento ao longo das drenagens Velocidade de médias a altas Mobilização de solo, rocha, detrito e água Grandes volumes de material Extenso raio de alcance, mesmo em áreas planas

Fonte: Augusto Filho (1992)

Entre os escorregamentos, o IPT (2007) acrescenta os deslizamentos induzidos, ou causados pela ação antrópica que são aqueles cuja deflagração é causada pela execução de cortes e aterros inadequados, pela concentração de águas pluviais e servidas, pela retirada da vegetação, etc.

Guerra (2011) salienta que o rastejo ou *creep* consiste num tipo particular de movimento de massa devido à natureza lenta de seu movimento, à grande área transversal e longitudinal que ele ocupa na encosta e por depender mais das variações climáticas ao longo do ano do que da gravidade.

O mesmo autor também aponta as diferenças elementares entre movimentos de massa e erosão como processos atuantes nas encostas. Os movimentos de massa apresentam caráter de ocorrência mais esporádico onde a gravidade/declividade possui o papel mais importante.

Nesse processo a água assume um papel de potencializador do evento através do desgaste do terreno ao reduzir a resistência ao cisalhamento da encosta e contribuir para o comportamento plástico e fluido dos solos. (Guerra, *op cit*).

Por sua vez, a erosão hídrica abrange processos pluviais, fluviais e marinhos. O processo associado diretamente com a estabilidade de encostas é a erosão pluvial que apresenta ocorrência mais contínua ao longo do tempo em relação aos movimentos de massa e tem como água e/ou o gelo, seu principal agente desencadeador (IPT, 2007).

Esse processo envolve geralmente o solo e é deflagrado pela ação de chuvas e compreende as seguintes etapas: impacto da chuva provocando desagregação das partículas, remoção e transporte do material particulado pelo escoamento superficial e deposição do material formando depósitos de assoreamento.

De forma geral, a mecânica da erosão é função da combinação do tamanho e da velocidade das gotas de chuva com a duração das precipitações e a velocidade do vento (Moreira & Pires Neto, 1998 *apud* IPT, *op cit*).

Segundo Infanti Jr & Fornasari Filho (1998), a erosão pluvial apresenta dois tipos de processos, o laminar e o linear, sendo que, de acordo com Salomão (2009), o escoamento linear é o estágio seguinte ao escoamento em lençol, com o aumento da concentração do fluxo de água.

Tipos de erosão hídrica:

1. Laminar (ou em lençol): processo de remoção de uma delgada e uniforme camada do solo superficial, provocada por escoamento difuso das águas pluviais.

2. Linear: decorrente da ação do escoamento hídrico superficial concentrado, apresentando-se em três tipos: sulcos, ravinas e voçorocas.

- Sulcos: São incisões com profundidades inferiores a 50 cm onde o mecanismo erosivo é o arrastamento das partículas de solo pelo escoamento concentrado.
- Ravinas: Caracterizadas como incisões maiores que os sulcos, mas não há afloramento do lençol freático e evoluem sob ação do arrastamento das partículas do solo pelo escoamento e por movimentos de massa.
- Voçorocas: Incisões onde há afloramento do lençol freático e que evoluem sob ação de vários processos, como escoamento concentrado, movimentos de massa e erosão de água subterrânea.

A erosão pode ser classificada tanto como agente, quanto como fenômeno de instabilização, porque altera a geometria da encosta enfraquecendo sua estrutura interna, e possibilita a ocorrência de outros fenômenos, tais como quedas e escorregamentos. A água pode atuar através da infiltração no maciço ou em determinadas partes do maciço, por meio de falhas, trincas, poros, juntas, etc. A pressão hidrostática pode levar o talude à ruptura, constituindo este, um processo frequente tanto em taludes rochosos como terrosos (IPT, 1985).

2.2.2 Condicionantes de Riscos Geológicos

2.2.2.1 Erosão Hídrica

O principal agente deflagrador dos processos erosivos em encostas é a água, que pode apresentar pressão positiva ou negativa e estar em movimento ou

não (hidrostática) sob condição de fluxo. De acordo com Gerscovich (2009), a influência da água na estabilidade das encostas pode ser atribuída a:

- Mudanças nas poro-pressões do solo, alterando a tensão efetiva e consequentemente, sua resistência e variando o peso da massa em função de mudanças no peso específico;
- Desenvolvimento de fluxo, gerando erosões internas e/ou externas;
- Atuando como agente no processo de intemperismo, promovendo alterações nos minerais constituintes.

As propriedades de fluxo de água, como a condutividade hidráulica, o índice de vazios e a capilaridade do solo, além da intensidade e da duração das chuvas determinam o avanço da água de chuva que infiltra no solo, a chamada "frente de saturação".

Cada episódio de chuva gera uma frente de saturação, que depende dos fatores citados acima. Quando a chuva acaba, ocorre uma redistribuição da água no subsolo, aumentando o teor de umidade. Se houver mais um episódio de chuva, a frente de saturação avançará mais rapidamente, porque com maior teor de umidade, maior condutividade hidráulica. (Carvalho, *op cit*).

Os fluxos de água estão diretamente ligados ao fator climático, através das precipitações e das oscilações térmicas. As condições climáticas chuvosas favorecem a ação de processos de intemperismo químico, que decompõe a rocha podendo gerar grandes espessuras de solo.

A intensidade, a duração e a freqüência das precipitações determinam o potencial da chuva de provocar erosão.

Já as oscilações térmicas favorecem o intemperismo físico, desagregando as rochas e solos, devido às dilatações e contrações sucessivas e a alternância de períodos secos e chuvosos gera fendas no solo, pelas quais a água proveniente das chuvas infiltra. A expansão dessas fendas acarreta na perda da coesão aparente entre as partículas do solo (Carvalho, *op cit*).

Segundo o IPT (2007), a perda de solo por erosão depende de fatores naturais, que podem ser agrupados em três conjuntos:

- Ligados à natureza do solo, envolvendo principalmente as suas características físicas e morfológicas, tais como: Textura, estrutura, espessura, permeabilidade, etc.;
- Ligadas à morfologia do terreno, envolvendo a conformação da encosta, no que se refere principalmente à declividade, comprimento e forma em planta da encosta;
- Ligados ao clima, envolvendo essencialmente a quantidade de água que atinge a superfície do terreno, causando remoção do solo através de chuvas.

Fatores litológicos e de cobertura vegetal e uso e ocupação do solo também tem papéis fundamentais no condicionamento de processos erosivos. A litologia associada ao intemperismo condiciona a suscetibilidade do material à erosão, e as falhas e fraturas representam superfícies de descontinuidade e menor resistência, que se constituem em caminhos preferenciais aos processos erosivos.

A textura e a estrutura do solo influem na relação entre infiltração da água da chuva e escoamento superficial, determinando suas características de permeabilidade, o que por sua vez, afetam na dinâmica e nas características hidrológicas subterrâneas, como a profundidade das zonas saturadas, direções dos fluxos e descontinuidades (Fernandes e Amaral, 2010).

Os efeitos hidrológicos tanto na erosão quanto nos movimentos de massa também são conhecidos. A profundidade da zona saturada, a velocidade e direção dos fluxos tanto superficiais como subterrâneos, a profundidade e espessura dos aquíferos, bem como as áreas de acúmulo de água superficiais são elementos que concorrem significativamente para a ocorrência de processos de instabilização.

Além do que, esses fatores associados à densidade de drenagem e ao escoamento superficial representam fatores que indicam quais processos são suscetíveis de ocorrer em determinada região.

Áreas com baixa densidade de drenagem estão geralmente associadas a topografias planas e solos com boa a alta permeabilidade, e tendem a produzir mais ocorrências de erosão laminar, enquanto áreas com alta densidade de drenagem, mais típicas em terrenos accidentados topograficamente, indicam probabilidades maiores de erosão em sulcos.

Diferentes formas de ocupação e de cobertura vegetal como culturas agrícolas, pastagens, mata secundária, ocupação urbana, etc, determinam o nível de exposição à chuva ao que o solo está submetido e por consequência, sua suscetibilidade à erosão.

A interferência humana altera o processo natural da erosão, acelerando sua ação e aumentando sua intensidade. Intervenções inadequadas de aterros com lixo, execução deficiente de sistemas de drenagem de água pluviais e servidas e traçados indevidos do sistema viário podem promover erosão acelerada (IPT, 2007).

2.2.2.2 Movimentos de Massa

Do ponto de vista mecânico, a instabilidade de um talude ou encosta ocorre quando as tensões cisalhantes mobilizadas se igualam à resistência ao cisalhamento, o que pode ocorrer com o aumento das tensões cisalhantes ou pela redução da resistência ao cisalhamento (Gerscovich, 2009).

Varnes (1978) *apud* Gerscovich (*op cit*) divide os mecanismos deflagradores de movimentos de massa em dois grupos, de acordo com os fatores que aumentam as tensões cisalhantes e os que reduzem a resistência ao cisalhamento, como mostra o Quadro 05.

De forma sintética, segundo Guidicini & Nieble (1976) *apud* Carvalho (2003), podemos separar os condicionantes naturais aos movimentos de massa em dois grupos: o dos agentes predisponentes e o dos agentes efetivos, e esses últimos são subdivididos em preparatórios e imediatos (Quadro 06).

Os fatores geológicos que condicionam os movimentos de massa englobam a litologia e as estruturas. A composição mineralógica e a granulometria, bem como a textura, o grau de coesão e a presença de estruturas tais como, xistosidade, foliação, estratificação, falhas, fraturas, etc., definem a permeabilização e a resistência ao intemperismo e consequentemente, a suscetibilidade a erosão e a movimentação de blocos rochosos.

Litologias friáveis são mais suscetíveis à desagregação e rochas mais homogêneas, por exemplo, os granitos, tendem a gerar estruturas como falhas e fraturas de alívio mais contínuas e paralelas a superfície, enquanto rochas heterogêneas, tipo gnáissicas, apresentam fraturas de modo geral, mais

descontínuas, condicionadas pelos planos de fraqueza do bandamento composicional. (Fernandes e Amaral, 2010).

Quadro 05 – Fatores deflagradores de movimentos de massa

AÇÃO	FATORES	FENÔMENOS GEOLÓGICOS / ANTRÓPICOS
Aumento da solicitação	Remoção de massa (lateral ou da base)	Erosão Escorregamentos Cortes
	Sobrecarga	Peso da água da chuva, neve, granizo, etc Acúmulo natural de material (depósitos) Peso da vegetação Construção de estruturas, aterros, etc.
	Solicitações dinâmicas	Terremotos, ondas, vulcões, etc. Explosões, tráfego, sismos induzidos
	Pressões laterais	Água em trincas Congelamento Material expansivo
Redução da resistência	Características inerentes ao material (geometria, estruturas, etc.)	Características geomecânicas dos materiais Tensões
	Mudanças ou fatores variáveis	Intemperismo: redução na coesão, ângulo de atrito Variações nas poropressões

Fonte: Gerscovich (2009)

O ângulo de mergulho das camadas litológicas e a direção das falhas e fraturas, caso sejam concordantes com o cimento da vertente, mostram-se favoráveis a movimentos de massa.

As rochas cristalinas, especialmente os granitos, são coerentes, impermeáveis, não plásticas, mas possuem planos de descontinuidade e são heterogêneas. Os arenitos apresentam além de planos de diaclasamento, planos de estratificação, sendo relativamente homogêneos. Os calcários são coerentes, pouco plásticos e homogêneos, distinguindo-se pela permeabilidade dada ao fissuramento e solubilidade (Cassetti, 2005).

Quadro 06 – Agentes de escorregamentos

AGENTES DOS ESCORREGAMENTOS	
Agentes predisponentes	<ul style="list-style-type: none"> • Complexo geológico • Complexo morfológico • Complexo climato-hidrológico • Gravidade • Calor solar • Tipo de vegetação original
Agentes Efetivos	<p>Preparatórios:</p> <p>Pluviosidade, erosão hídrica e eólica, congelamento e degelo, variação de temperatura, dissolução química, ação de fontes e mananciais, oscilação de nível de lagos e marés e do lençol freático, ação de animais e humana, inclusive desflorestamento.</p> <p>Imediatos:</p> <p>Chuva intensa, fusão de gelo e neves, erosão, terremotos, ondas, vento, ação humana, etc.</p>

Fonte: Carvalho (2003)

Os xistos possuem fraca resistência à erosão por escoamento superficial e têm grande plasticidade (Casseti, *op cit*), enquanto nos gnaisses, o intemperismo afeta minerais alcalinos (K, Ca, Mg) o que provoca a dissolução de bases e neutraliza a acidez da água subterrânea, causando a formação de montmorilonita. Esta tem seu volume expandido devido à umidade, o que provoca abertura de fendas, tornando mais instáveis as vertentes (Thomas, 1979; Chorley et al., 1984).

O papel dos solos na deflagração de movimentos de massa envolve a espessura e as características do mesmo, como textura, estrutura, porosidade e consistência, que são os aspectos mais importantes para determinar sua permeabilidade e erodibilidade.

Feições estruturais reliquiais de descontinuidades, como falhas, fraturas e bandamentos presentes no solo podem atuar no condicionamento da distribuição das poro-pressões no interior da encosta e gerar planos preferenciais ao longo dos quais o intemperismo avança mais rapidamente do que sobre a massa saprolítica não-fraturada (Fernandes e Amaral, 2010).

Regolitos e solos pouco permeáveis, com alto teor de argila, favorecem a retenção da umidade e a saturação, o que concorre com o aumento do escoamento superficial.

O aumento do grau de saturação do solo pela água por aquíferos ou por áreas de acumulação superficial aumenta a susceptibilidade aos movimentos de massa e à erosão porque este perde a coesão aparente entre as partículas, favorecendo a instabilidade. Ou seja, a água reduz a resistência ao cisalhamento do material de solo ou rocha que compõe a encosta (Carvalho, 2003).

A presença de tálus e regolitos espessos na vertente contribui para a ocorrência de movimentos de massa. Os tálus, inclusive, são materiais inconsolidados resultantes de movimentos de massa pretéritos que submetidos a elevada pluviosidade ou solapamento de base promovida por erosão fluvial pode voltar à instabilidade.

Muitos depósitos de encostas estão assentados diretamente sobre a rocha-sã e a drástica redução da condutividade hidráulica nesse contato favorece a geração de fluxos subsuperficiais que podem promover a instabilidade do material inconsolidado (Fernandes e Amaral, *op. cit.*).

Segundo Fernandes e Amaral (*op. cit.*), o tipo de movimento de massa nos solos saprolíticos pode estar relacionado às características das fraturas relíquias. Escorregamentos rotacionais ou circulares predominam em encostas onde as fraturas se encontram pouco espaçadas e os escorregamentos translacionais ou planares predominam em encostas com juntas reliquiais originadas a partir da alteração de fraturas de alívio de tensão ou a partir da alteração de bandas compostionais.

A geomorfologia é o componente ambiental mais importante no condicionamento de movimentos de massa, que são por definição, produzidos por efeito gravitacional e favorecidos pelos efeitos das chuvas. Do ponto de vista geomorfológico, os aspectos mais importantes como deflagradores de movimentos de massa são a declividade e a curvatura e comprimento das vertentes.

A declividade expressa a inclinação da vertente em relação ao plano horizontal e pode ser medida em graus ou porcentagem (Cunha, 1991 *apud* Santos, 2007). A velocidade de deslocamento de material e a capacidade de transporte de massas sólidas e líquidas são diretamente proporcionais à declividade. No entanto,

em encostas íngremes onde o regolito é menos espesso, o risco de escorregamentos pode ser em tese, reduzido.

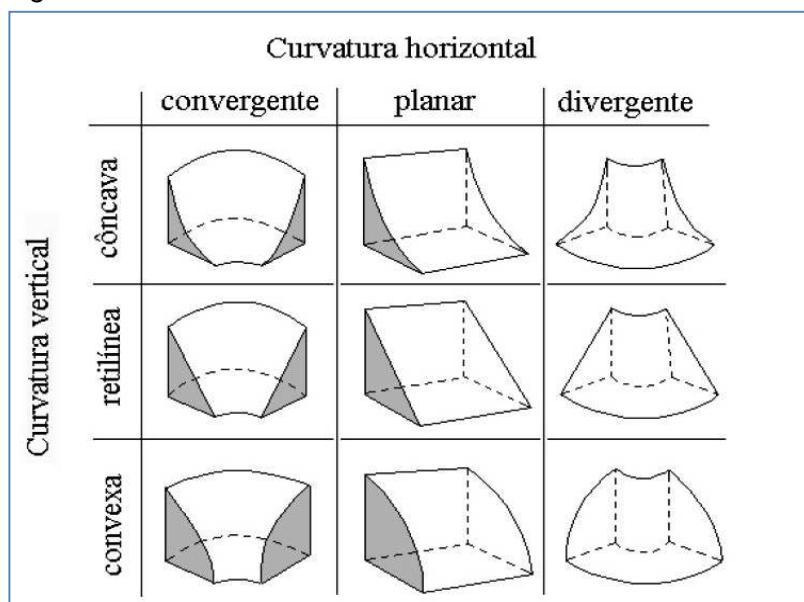
As vertentes assumem curvaturas verticais (côncava, retilínea ou convexa) e horizontais (convergente, planar ou divergente), como pode ser visto na figura 3.

Vertentes convexas provocam divergência de escoamento e são menos suscetíveis à erosão, ao contrário das vertentes côncavas que tendem a concentrar fluxo superficial e apresentam menores espessuras de solo em relação às encostas convexas, sendo mais favoráveis ao processo de escorregamentos translacionais, que envolvem uma fina camada do solo (Silva *et al*, 2003 *apud* Santos, 2007, Augusto Filho, 1988 *apud* Carvalho, 2003).

A orientação das vertentes tem relação direta com a exposição à pluviosidade, insolação e direção predominante dos ventos. Vertentes que retém mais umidade estão, em geral, opostas à insolação ou voltadas para a umidade transportada por ventos ou por pluviosidade.

O comprimento da rampa ou da vertente também tem importante influência sobre o comportamento do escoamento superficial, determinando a velocidade do fluxo e o seu grau de confluência. (Floreziano, 2008)

Figura 03 – Curvaturas das vertentes



Fonte: Adaptada de Dikau (1990) *apud* Valeriano (2008)

A vegetação é essencial na proteção do solo contra a ação das chuvas porque reduz a energia cinética da precipitação e consequentemente contribui na redução do escoamento superficial, que diminui os riscos de movimentos de massa e erosão.

Além disso, como já comentado, a água acarreta a perda da coesão entre as partículas do solo. A folhagem da vegetação reduz a umidade do solo pela intercepção da chuva e pela evapotranspiração, o que ocasiona a diminuição da poro-pressão e a elevação da sucção, aumentando a coesão e a resistência ao cisalhamento da rocha e/ou solo. (Wu *et al*, 1979 *apud* Lemes, 2001)

A cobertura vegetal pode também produzir efeitos desfavoráveis na estabilidade das encostas. O peso das árvores expostas ao vento sobre o talude gera uma sobrecarga sobre o mesmo, transmitindo forças dinâmicas ao solo que pode gerar instabilização na encosta, num processo chamado “efeito alavancas” (Lemes, *op cit*).

Além disso, a penetração das raízes em fendas pode provocar o “efeito cunha” nos solos e em blocos rochosos, que consiste na desagregação desses materiais. (Prandini *et al*, 1976 *apud* Tabalipa e Fiori, 2008).

O sistema radicular das plantas também pode atuar tanto no incremento da resistência ao cisalhamento, aumentando a coesão do solo, como no reforço de geração de canais preferenciais de infiltração e como desencadeador da desagregação mecânica do solo.

Apesar dos efeitos contrários, é consenso entre diversos autores que a retirada da cobertura vegetal é um poderoso fator de instabilização. (Gerscovich, 2009).

Com relação aos condicionantes antrópicos, pode-se citar como principais agentes deflagradores de movimentos de massa fundamentalmente os itens relativos às formas de uso e ocupação do solo e subsolo, tais como: (IPT, 2007):

- A remoção da cobertura vegetal;
- O lançamento e concentração inadequada de águas pluviais e/ou servidas;
 - O vazamento na rede de água e esgoto;
 - A presença de fossas, a execução de cortes com alturas e inclinações acima de limites tecnicamente seguros;

- A execução deficiente de aterros (compactação, geometria, fundação), a execução de patamares (“aterros lançados”) com o próprio material de escavação dos cortes, o qual é simplesmente lançado sobre o terreno natural;
- O lançamento de lixo nas encostas/taludes;
- A retirada do solo superficial expondo horizontes mais suscetíveis, deflagrando processos erosivos, bem como elevando o fluxo de água na massa do solo.

Na Serra de Baturité, a presença de áreas de instabilidade geotécnica e ocorrência de movimentos de massa estão associadas principalmente aos cortes de rodovias e à ocupação de encostas nas áreas urbanas.

2.4 Geoprocessamento

O geoprocessamento utiliza os conceitos de diversas ciências (Geodésia, Cartografia, Matemática, Estatística, Informática, etc.) para gerar e disponibilizar informações essenciais no processo decisório, tanto no nível de planejamento, como de execução de ações de gestão ambiental (Burrough, 1991).

Esse conjunto de tecnologias baseia-se na coleta, tratamento, manipulação e apresentação de informações espaciais voltado para um objetivo específico (Rodrigues, 1993) e contempla um amplo conjunto de técnicas como topografia, fotogrametria, GPS (*Global Position System*) e principalmente, SIG's (Sistemas de Informações Geográficas) e o Processamento Digital de Imagens (PDI), que é uma das aplicações do Sensoriamento Remoto.

2.4.1 SIG's e Análise Espacial

Os SIG's permitem a elaboração de análises espaciais através de diferentes métodos como Modelo Binário, Modelo Multi-Criterial Ponderado ou Processo Analítico Hierárquico (AHP), Álgebra de Mapas, Lógica Fuzzy, entre outros (Câmara *et. al.*, 2001).

Segundo Bonham-Carter (1994), SIG's são sistemas de computador para o gerenciamento de dados espaciais, georreferenciados, interrelacionados e ligados

a diferentes funções, exercendo tarefas de entrada, manipulação, transformação, visualização, buscas, análises modelagem e saída; ao lado do Processamento Digital de Imagens (PDI).

A maior finalidade dos SIGs é fornecer suporte a tomada de decisões com base em dados espaciais, como por exemplo, na abertura de rodovias, na agricultura de precisão, no mapeamento geológico e geotécnico, entre outros

2.4.2 Sensoriamento Remoto e PDI

O processamento digital de imagens (PDI) é a manipulação da imagem adquirida por um sensor remoto, envolvendo técnicas como filtragem, manipulação do contraste ou classificação, entre outras, cujo objetivo é identificar, extrair, condensar e realçar a informação de interesse para determinado fim, de forma a remover degradações e distorções inerentes aos processos de aquisição, transmissão e visualização das imagens (Crosta, 1992).

Com o PDI é possível obter dados importantes de imagens orbitais e suborbitais e extrair informações específicas de cunho ambiental, geológico, estrutural, no monitoramento de uso do solo, de processos geomorfológicos, na área da agricultura, na pesquisa mineral, etc.

O sensoriamento remoto pode ser utilizado ainda para a identificação e caracterização de movimentos de massa e outros processos geodinâmicos, permitindo a análise e zoneamento de extensas áreas, e é possível se obter séries históricas de imagens da área estudada.

Os sensores remotos estão classificados quanto à fonte de energia, em duas categorias: os ativos e os passivos. Os sensores ativos são os que produzem sua própria energia e os passivos são os que dependem de uma fonte externa de energia. Como exemplo de produtos obtidos por sensores passivos, pode-se citar as fotografias aéreas e as imagens de satélites e, como exemplo de produtos obtidos por sensores ativos, pode-se citar as imagens de radar (Novo, 1995).

Os sistemas ópticos são classificados como passivos, pois dependem de fonte externa de energia (geralmente a solar) e fornecem informações sobre a superfície terrestre nas faixas do espectro eletromagnético correspondentes ao visível e ao infravermelho (Novo, *op. cit.*).

Os dados de radar (*Radio Detecting and Ranging*) de abertura sintética são adquiridos na faixa espectral de micro-ondas, que possui comprimentos de onda de 1mm a 1m e intervalo de frequência de 300 GHz a 300 MHz. Seus sensores são denominados ativos, pois produzem a própria radiação e interagem fisicamente com o alvo, captando seu reflexo (Moraes, 2002).

Os sensores de radar têm a vantagem de penetração nas nuvens, menor influência atmosférica, operação durante o dia e a noite e independência quanto às condições climáticas e de iluminação solar (Chaves et. al., 2003).

Neste trabalho, o uso de sensores ópticos e de radar foi fundamental na obtenção de dados relativos ás estruturas geológicas utilizadas como atributos do meio físico para o mapeamento geotécnico.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Levantamento Bibliográfico e Cartográfico

A etapa inicial deste trabalho consistiu no levantamento bibliográfico e cartográfico da área da pesquisa. As fontes bibliográficas foram em boa parte obtidas junto aos acervos de instituições públicas como CPRM e SEMACE e em relatórios de graduação, dissertações e teses dos Departamentos de Geologia, Geografia e Solos da UFC.

Uma série de trabalhos publicados sobre essa temática em algumas cidades da região, entre os quais o de Paes (2004), em Pacoti, Da Silva (2007), em Aratuba, e Mota & Oliveira (2011), em Guaramiranga, serviram de fonte de dados acessórios para uma compilação e aprofundamento do tema num trabalho que compreenda toda a região.

Outra parte do material bibliográfico utilizado, relatórios técnicos e trabalhos acadêmicos em geral, foram obtidos pela internet, em sites de instituições públicas e privadas, de universidades, de revistas eletrônicas e bibliotecas virtuais.

Para a elaboração do mapeamento básico e temático foram utilizadas as cartas topográficas em meio digital da DSG/SUDENE - Folhas Baturité SB.24-X-A-I e Canindé SB.24-V-B-III, além de imagem do satélite LANDSAT7/ ETM, de resolução de 30 metros, cena 217-063 de 22/04/2002.

Foram utilizados também imagens de radar interferométrico da missão SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*), da NASA, refinados pelo projeto TOPODATA, do INPE e arquivos digitais nos seguintes formatos: *shapefile* (SHP), DWG, DXF, GeoTIFF e ESRIGRID.

Auxiliaram na geração dos mapas, produtos cartográficos de instituições públicas como CPRM e Embrapa. Foram eles:

- Mapa Geológico Folha Baturité SB.24-X-A-I, CPRM, 2012. Escala 1: 100.000
- Mapa Geológico Folha Quixadá SB.24-V-B, CPRM, 2007. Escala 1:250.000
- Mapa Geológico do Ceará, da CPRM, 2003. Escala 1: 500.000
- Mapas Exploratório-Reconhecimento de Solos do Estado do Ceará, 1973, Embrapa. Escala: 1:600.000.

3.2 Etapa de Campo

As etapas de pesquisa de campo envolveram os trabalhos de reconhecimento geológico, geomorfológico e pedológico além da coleta de amostras de solo para a realização de ensaios de investigação geotécnica.

Complementarmente, dados de permeabilidade foram obtidos em outros trabalhos realizados na região, como Paes (2004), Da Silva (2007) e Mota & Oliveira (2011), os atributos morfológicos, físicos e químicos dos solos das duas vertentes da Serra de Baturité, adquiridos a partir do trabalho de Barbosa (2008), foram utilizados na compilação dos dados para obtenção dos resultados de erodibilidade.

Os levantamentos geológico e geomorfológico foram auxiliados também com dados preliminares de trabalhos anteriores, como Amorim (2000), Torres (2004), Paes (*op cit*), Da Silva (*op cit*), Bétard, Sales e Peulvast (2007), Sales e Peulvast (2007) e Bastos (2012), além dos mapas geológicos da CPRM.

3.2.1 Levantamento Geológico

O levantamento geológico consistiu no detalhamento e aprimoramento de mapeamentos geológicos pré-existentes através da descrição de perfis de estrada e de afloramentos. Apesar de ter se refinado alguns contatos litológicos a partir de trabalhos pré-existentes, a maior parte do levantamento geológico teve como objetivo o detalhamento de feições estruturais, como a direção e ângulo de mergulho de foliações e fraturas, principalmente em cortes de estradas.

Na definição dos pontos de coleta de amostras de solo para os ensaios geotécnicos também foi considerada a tipologia litológica.

3.2.2 Levantamento Geomorfológico

Esta etapa teve como meta estabelecer possíveis retificações da divisão e classificação das unidades de relevo produzidas previamente em laboratório tendo como base parâmetros de declividade, amplitude local e formas das encostas e, definir os pontos de coleta de amostras de solo para os ensaios geotécnicos baseados nas unidades geomorfológicas.

3.2.3 Levantamento de Materiais Inconsolidados

A avaliação dos tipos de solo e dos perfis de alteração é de fundamental importância para a caracterização das unidades geotécnicas, uma vez que implica numa melhor caracterização qualitativa e reforça a validade dos dados obtidos.

A importância deste tipo de levantamento consiste nas diferenças observadas de comportamento geotécnico entre as rochas e os solos. Para efeitos de classificação geotécnica, considerou-se material inconsolidado, aqueles que não ofereciam resistência à escavação mecânica (Cottas, 1983).

A coleta de material para os ensaios geotécnicos também levou em conta os aspectos pedológicos da região, tendo sido selecionado pontos de coleta de acordo com os tipos pedológicos encontrados.

3.2.4 Coleta de Amostras de Solo

Nesta etapa foram coletadas amostras indeformadas em diferentes pontos visitados para a realização dos ensaios de permeabilidade, granulometria e determinação de matéria orgânica. Esses ensaios são necessários para a obtenção dos cálculos de erodibilidade, como será mostrado no tópico 3.4.1.

Para a obtenção dos resultados de erodibilidade, considerou-se o mapa de solos da região, compilado a partir dos mapas Exploratório-Reconhecimento de Solos da Embrapa (1973) e de trabalho de Bétard, Peulvast e Sales (2007), para extrapolar para cada tipo de solo, os valores obtidos nos ensaios geotécnicos.

A seleção dos pontos de amostragem se deu através da identificação em campo das unidades pedológicas. Esse método de seleção de amostragem, denominado por Zuquette e Gandolfi (2004) de amostragem não-aleatória racional consiste na seleção dos locais que melhor representem o aspecto que se pretende estudar.

Foram coletadas amostras em todas as associações de solos, e delas, feito uma média aritmética para se chegar ao valor da erodibilidade em cada tipo de solo. Paralelamente, buscou-se na literatura, para efeito comparativo, índices de erodibilidade em outras regiões para as classes de solo encontradas na região de estudo, e assim, avaliar a confiabilidade dos resultados obtidos.

A seguir, é descrito o método de coleta para a realização dos ensaios de granulometria, permeabilidade e matéria orgânica.

3.2.4.1 Granulometria

O material inconsolidado de aproximadamente 1,5 kg foi coletado em sacos plásticos, devidamente embalado e identificado, para serem trabalhados posteriormente, em laboratório.

3.2.4.2 Permeabilidade

A coleta do material para o ensaio de permeabilidade em permeâmetros de carga variável e constante é realizada com a utilização de um cilindro vazado para a coleta de amostra de solo indeformado (Figura 04).

Figura 04 – Cravamento de cilindro com bate-estaca manual para coleta de amostra indeformada para ensaio de permeabilidade.



Fonte: Autor

Crava-se o cilindro de aproximadamente 15 cm no chão com o auxílio de uma haste de ferro e um peso que é levado até o final da haste e jogado para baixo facilitando a cravação do cilindro no solo. Depois de cravado todo o cilindro, o material ao seu redor é retirado, de forma a garantir a obtenção da amostra de solo indeformada.

O material foi devidamente embalado, identificado e guardado com cuidado para que não ocorra deformação no corpo de prova (amostra) e alterações de suas características “*in situ*” até que se faça o ensaio no laboratório.

3.2.4.3 Matéria Orgânica

Para este ensaio, também foi coletado, embalado e identificado aproximadamente 0,5 kg de material inconsolidado próximo ao ponto de coleta dos ensaios de granulometria e de permeabilidade.

3.3 Etapa de Laboratório

A etapa de laboratório consistiu nos ensaios de investigação geotécnica teve como objetivo avaliar as propriedades do solo frente às solicitações naturais ou induzidas pelo homem. Os ensaios realizados neste trabalho têm como finalidade principal avaliar na área da pesquisa a suscetibilidade dos solos (erodibilidade) à erosão e subsidiar a elaboração dos documentos cartográficos.

As coletas de amostras de solo tiveram como objetivo determinar o fator K das amostras, o coeficiente de percolação de água através do solo em regime de escoamento laminar.

3.3.1 Granulometria

A análise granulométrica foi realizada no laboratório de Prospecção Geoquímica e Geotécnica (LAGETEC) do Departamento de Geologia (DEGEO) da UFC usando-se as 16 (dezesseis) amostras de solo (horizonte A) coletadas em campo, utilizando a norma da ABNT – Solo (Análise Granulométrica) NBR 7181, Dez/1984.

O objetivo deste ensaio foi determinar as dimensões das partículas e suas proporções relativas de ocorrência de forma a se obter o traçado da curva granulométrica de um determinado solo.

A curva granulométrica apresenta intervalos de variação do tamanho das partículas de cada um dos solos que é utilizada na classificação textural dos mesmos.

O ensaio pode ser realizado através do peneiramento apenas para o material granular, ou através da sedimentação para solos finos, ou ainda por meio de análise granulométrica conjunta, que compreende tanto o peneiramento quanto a sedimentação (solos com partículas grossas e finas).

O método do peneiramento separa as partículas até a dimensão de 0,075 mm (peneira Nº 200), enquanto o método da sedimentação em água destilada é utilizada para separar as partículas menores que 0,075 mm.

Como o intuito deste trabalho é a utilização dos dados granulométricos para a aplicação no nomograma de Wischmeier *et al* (1978), foi utilizado apenas o método de peneiramento, uma vez que nesse método, as propriedades texturais são discriminadas apenas em % de areia e % de silte + areia muito fina.

Para a execução deste ensaio é necessária a utilização combinada da norma NBR 7181 com a NBR 6457 (Amostras de Solo – Preparação para Ensaios de Compactação e Ensaios de Caracterização) e com a NBR 5734 (Peneiras para Ensaio – Especificação).

De acordo com tais normas, o procedimento para este ensaio é o seguinte:

Equipamentos e acessórios:

- Série de peneiras (Tyler);
- Agitador de peneira “Ro-Tap”;
- Balança para 1 Kg, sensível a 0,1 g;
- Cápsula de porcelana ou metálica;
- Estufa que mantenha temperatura entre 105º e 110º C.

Observações:

- Peneiramento grosso: até a peneira Nº 10
- Peneiramento fino: da peneira Nº 40 até a peneira Nº 200
- Sedimentação: a partir da peneira Nº 200

As séries das peneiras estão de acordo com o quadro 07 a seguir:

Quadro 07 – Diâmetro e numeração de peneiras usadas no ensaio de granulometria

Peneiras	3½"	3"	2½"	2"	1½"	1"	¾"
mm	8	7	63,3	50,8	38,1	25,4	19,1
Peneiras	½"	3/8"	4	10	40	100	200
mm	12,7	9,5	4,8	2,0	0,42	0,15	0,075

Procedimento (Peneiramento Grosso – Amostra total):

Trabalha-se com uma amostra representativa de solo, obtida do repartidor de amostras, passada no almofariz e destorroada.

- Passa-se o material destorrado na peneira Nº 10 (2,0 mm);
- O material que fica retido na peneira deverá ser lavado na própria peneira. Desta forma será retirado todo material fino aderente aos grãos do material retido;
- Transfere-se o material retido e lavado para uma das cápsulas numeradas e leva-se à estufa para secagem, durante um período de no mínimo 12 horas;
- Procede-se ao peneiramento o material seco nas peneiras 40, 100 e 200.
- Pesam-se as frações do material retidas em cada peneira. Calculam-se as percentagens do material retido em cada uma das peneiras, em relação ao peso da amostra total seca.

Cálculos e resultados:

Determinação do peso da amostra total seca:

- Calcula-se o peso do material retido na peneira Nº 10 somando-se os pesos dos materiais retidos nas peneiras de peneiras 40, 100 e 200;
- Subtrai-se do peso total das amostras úmida, o peso do material retido na peneira Nº 10 (2,00 mm);
- Multiplica-se a diferença encontrada pelo fator de correção $f = 100 / (100 + h)$, onde h é a umidade higroscópica do solo (umidade da porção mais fina);

- Soma-se o produto obtido ao peso do material retido na peneira Nº 10 e obtém-se o peso da amostra seca total.
- Determina-se o peso total da amostra seca pela seguinte relação:

$$Ps = \frac{(Pt - Pg)}{100 + h} 100 + Pg$$

Onde:

Ps = Peso total da amostra seca;

Pt = Peso total da amostra seca ao ar

Pg = Peso do material retido na peneira Nº 10

h = Umidade higroscópica do material passado na peneira Nº 10

As percentagens do material que passa nas peneiras 50; 38; 25; 19; 12; 9; 5; 4,8 e 2,00 mm (peneiramento grosso) são calculadas pela expressão:

$$Qg = \frac{Ps - Pt}{Ps} 100$$

Onde:

Qg = Percentagem do material passado em cada peneira

Ps = Peso total da amostra seca

Pt = Peso do material retido acumulado

3.3.2 Permeabilidade

O objetivo deste ensaio é determinar o coeficiente de percolação de água através do solo em regime de escoamento laminar.

Equipamentos e Acessórios:

- Permeâmetro;
- Torninho de Talhagem;
- Balança com capacidade de 1000 g. com precisão de 0,01 g;
- Estufa;

- Termômetro;
- Paquímetro;
- Cronômetro;
- Proveta graduada;
- Tubos manométricos (com escala graduada).

A permeabilidade dos solos baseia-se no conceito definido pela Lei de Darcy, que em 1850, verificou como os diversos fatores geométricos, indicados na figura abaixo, influenciavam a vazão da água, expressando a equação de Darcy:

$$Q = k \frac{h}{L} A$$

Onde:

Q – vazão;

A - área do permeâmetro;

k - o coeficiente de permeabilidade;

h – carga dissipada na percolação;

L – distância na qual a carga é dissipada.

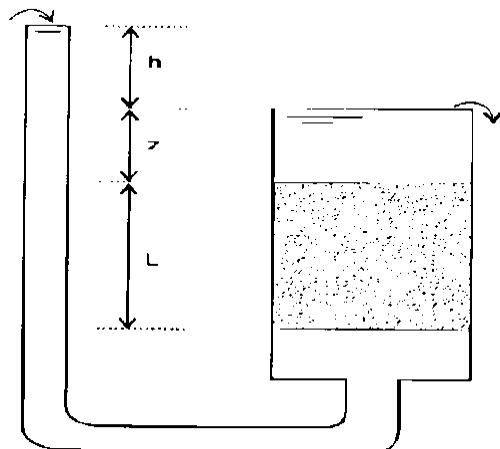
A relação $\frac{h}{L}$ é chamada de gradiente hidráulico, expressa pela letra i .

Então: $Q = KiA$

A vazão dividida pela área indica a velocidade com que a água sai da amostra. Esta velocidade, v , é chamada de velocidade de percolação. A lei de Darcy é válida somente para os casos de fluxo laminar, conforme mostra a figura 05.

Então: $v = ki$

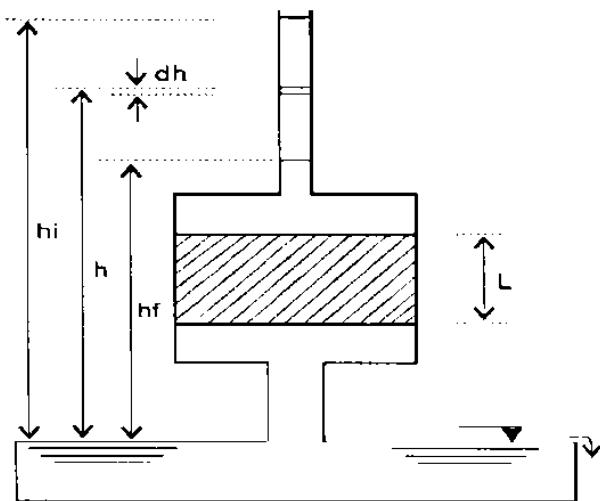
Figura 05 – Percolação de água em permeâmetro



Para a realização do ensaio é necessária a determinação da área da seção transversal da bureta, espessura do corpo de prova, teor de umidade, altura inicial e final do nível de água e temperatura. Para a obtenção dos cálculos, deve-se calcular a área e volume do corpo de prova e seus índices físicos antes do ensaio.

Quando o coeficiente de permeabilidade é muito baixo, no caso de solos argilosos, como é o caso dos Argissolos da região do maciço de Baturité, a determinação pelo permeâmetro de carga constante é pouco precisa. Emprega-se, então, o permeâmetro de carga variável, como esquematizado na Figura 6.

Figura 06 – Permeâmetro de Carga Variável



A determinação do coeficiente de permeabilidade à carga variável é regida pela norma NBR 14.545 (2000) – ABNT - “Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos à carga variável.” As amostras de solo foram analisadas no LAGETEC, do Departamento de Geologia da UFC.

No ensaio de permeabilidade à carga variável, medem-se os valores obtidos para diversos valores de tempo decorrido desde o início do ensaio. São anotados os valores da temperatura quando da efetuação de cada medida.

Onde:

a - área interna do tubo de carga (cm^2)

A - seção transversal da amostra (cm^2)

L - altura do corpo de prova (cm)

h_0 - distância inicial do nível d'água para o reservatório inferior (cm)

h_1 - distância para o t1, do nível d'água para o reservatório inferior (cm)

Δt - intervalo de tempo para o nível d'água passar de h_0 para h_1 (cm)

Calcula-se o coeficiente de permeabilidade a uma temperatura 20°C, o que deve ser feito juntamente com o fator de correção (0,811) com a temperatura realizada no ensaio. Essa temperatura é referente à viscosidade da água, onde T é a temperatura da água no ensaio à 20°C. O quadro 5 mostra os valores típicos de permeabilidade juntamente com a sua classificação (Haan *et. al.*, 1994).

3.3.3 Matéria Orgânica

As determinações da matéria orgânica foram realizadas no laboratório de Solos, do Departamento de Ciências do Solo da UFC. As amostras de solos coletadas em campo foram analisadas com intuito de determinar o teor de carbono orgânico através do método utilizado pela EMBRAPA (1998).

Esse método baseia-se no princípio volumétrico pelo bicromato de potássio, onde o carbono da matéria orgânica da amostra é oxidado a CO^2 e o cromo (Cr) da solução extratora é reduzido da valência +6 ($\text{Cr}+6$) à valência +3 ($\text{Cr}3+$). Na sequência, faz-se a titulação do excesso de bicromato de potássio pelo sulfato ferroso amoniacial.

O cálculo da percentagem de carbono orgânico existente na amostra pela seguinte expressão (1).

$$C \text{ (g/Kg)} = (40 - \text{volume gasto}) \cdot f \cdot 0,6 \quad (1)$$

Onde:

$f = 40 / \text{volume sulfato ferroso gasto na prova em branco}$

A percentagem de matéria orgânica é calculada multiplicando-se o resultado do carbono orgânico por 1,724, expressão (2). Este fator é utilizado em virtude de se admitir que o carbono participa com 58% na composição média do húmus:

$$\text{Matéria orgânica (g/Kg)} = C \text{ (g/Kg)} \cdot 1,724 \quad (2)$$

3.4 Etapa de Escritório

Os trabalhos relativos à etapa de escritório corresponderam ao tratamento de dados para obtenção dos produtos cartográficos do mapeamento geotécnico. Esse tratamento incluiu a adaptação metodológica para a elaboração das cartas de erodibilidade e erosividade, descritas a seguir, como da aplicação e uma série de técnicas de geoprocessamento, incluindo processamento digital de imagens de satélite, geoestatística, álgebra de mapas e cartografia digital

3.4.1 Erodibilidade (K)

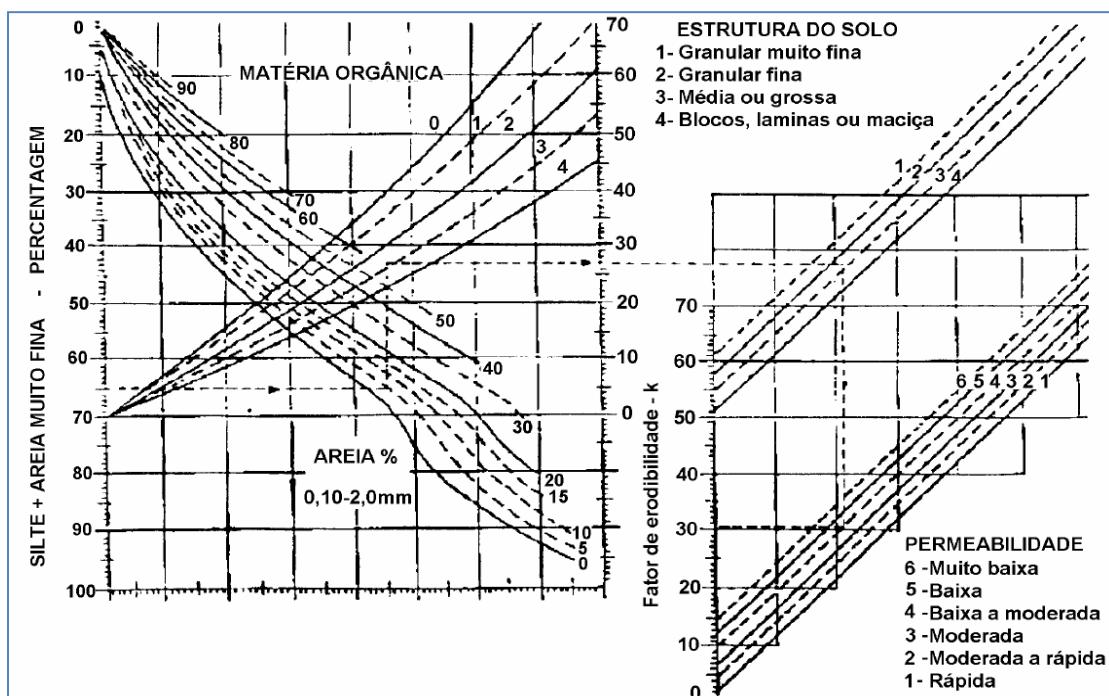
Os valores de erodibilidade ou K podem ser determinados por medições diretas em campo, como a instalação de tanques coletores de enxurradas, ou ainda estimados por métodos indiretos em escritório.

Os métodos indiretos são menos morosos e possuem menores custos que as medições diretas em campo, e entre eles, destaca-se o Nomograma de Wischmeier (Figura 07), que relaciona o K com as propriedades do solo.

O fator K está relacionando diretamente com as propriedades físicas e químicas do solo, representando a susceptibilidade à erosão dos diferentes tipos de solos quando submetidos às mesmas condições de chuva, declive, manejo e práticas conservacionistas.

Salienta-se que os valores obtidos pelo nomograma de Wischmeier *et al* (1978) estão no sistema inglês, devendo ser multiplicado pelo fator de correção 0,1317 ser usado no sistema internacional (Baptista, 2003).

Figura 07 – Nomograma de Wischmeier



Fonte: Baptista (2003).

Outro ponto a ser levantado sobre esse método, é que o mesmo não utiliza dados de teores de argila, o que pode acarretar numa superestimação da erodibilidade quando aplicado em solos tropicais, notadamente mais ricos em argila que os solos dos climas temperados, ambiente no qual o método foi desenvolvido (Baptista, *op. cit.*).

A erodibilidade dos solos obtida através do nomograma de Wischmeier *et al* (1978) é feita a partir das análises e do cruzamento dos parâmetros de teor de matéria orgânica, granulometria, estrutura do solo e permeabilidade, obtidos nos ensaios realizados em laboratório e em campo.

A utilização do nomograma acontece com a entrada inicial da soma dos percentuais silte e areia muito fina da amostra de solo em questão. A partir deste valor é traçado no eixo das abscissas uma linha horizontal, seguindo ao encontro do conjunto de curvas que representam o percentual de areia (0,10 – 2,0 mm) da amostra.

Em seguida, traça outra linha, desta vez vertical e seguindo na direção do nomograma, encontrando as retas representativas do percentual de matéria orgânica na amostra.

A partir deste ponto, desenha outra linha horizontal, e seguindo para direita, indo de encontro no quadro seguinte, à família de retas de estrutura do solo, em seguida com uma vertical descendente, ao encontro do conjunto de retas que representam a permeabilidade da amostra de solo e por fim segue por uma linha horizontal para a esquerda, achando-se o valor de K da amostra estudada.

Para o uso do nomograma de Wischmeier, deve-se ter por base as classificações dos quadros 08, 09 e 10.

Quadro 08 – Classificação estrutural do solo.

Diâmetro dos Grãos	Solos	Classificação
<0,002mm	Muito fino (mais de 50% de finos)	1
0,002 – 0,1	Médio a Grosso (mais de 50% de areia)	2
0,1 – 2	Médio a Grosso (mais de 50% de areia grossa)	3
>2mm	Grosso a maciço (mais de 50% de pedregulho)	4

Fonte: Almeida (2001).

Quadro 09 – Classificação dos valores de permeabilidade

Classificação	Permeabilidade (cm/s)	Permeabilidade(mm/h)	Categoria
6	$< 2,8 \times 10^{-5}$	< 1	Muito Lenta
5	$2,8 \times 10^{-5} - 5,6 \times 10^{-5}$	1 – 2	Lenta
4	$5,6 \times 10^{-5} - 1,4 \times 10^{-4}$	2 – 5	Lenta a Moderada
3	$1,4 \times 10^{-4} - 5,6 \times 10^{-4}$	5 – 20	Moderada
2	$5,5 \times 10^{-4} - 1,7 \times 10^{-3}$	20 – 60	Moderada a rápida
1	$> 1,7 \times 10^{-3}$	> 60	Rápida

Fonte: Hann. (1994).

Quadro 10 – Fator de erodibilidade do solo

Fator K	Classificação de erodibilidade	Faixa do Fator K t/ha(ha.mm/h)
1	Fraca	< 0,15
2	Média	0,15 < K < 0,30
3	Forte	K > 0,30

Fonte: Almeida (2001).

3.4.2 Erosividade (R)

A erosividade é um índice numérico que expressa a capacidade da chuva de causar erosão em uma área sem proteção. Sua ação depende da intensidade, duração e frequência das chuvas (Bertoni & Lombardi Neto, 1985).

Os ensaios de erosividade visam quantificar e qualificar os dados de perdas de solo por erosão laminar com base nas informações pluviométricas. A avaliação das ocorrências de erosão linear foi feita neste trabalho a partir de interpretação de imagens de satélite e de levantamento de campo.

O método mais utilizado em todo mundo para quantificar as perdas de solo é a Equação Universal de Perdas de Solo ou USLE (*Universal Soil Loss Equation*), desenvolvida por Wischemeier & Smith (1978) e expressa pela seguinte fórmula:

$$A = R \cdot K \cdot L \cdot S \cdot C \cdot P \quad (3)$$

Onde:

A – média anual de perdas de solo em t/ha.ano;

R – fator de erosividade da chuva em MJ.mm/ ha.h.ano;

K – fator de erodibilidade do solo em t.h/ MJ.mm;

L – fator de comprimento de rampa em m;

S – fator de declividade em %

C – é o fator de uso e manejo do solo;

P – é o fator de prática conservacionista do solo

Segundo Baptista (2003), a USLE é empregada com bons resultados para quantificar a perda de solos em áreas pequenas, compatíveis com o uso agrícola e a variação ao longo do ano do fator R na equação permite estabelecer a melhor época para se estabelecer práticas de manejo e conservação do solo.

Em avaliação de áreas maiores, a USLE permite apenas avaliar qualitativamente os diferentes graus de susceptibilidade à erosão de áreas homogêneas identificadas, não devendo ser empregada para estimar ou quantificar a perda de solos por erosão laminar e sendo necessário o uso de ferramentas de geoprocessamento para complementar a análise em nível regional.

A adoção de técnicas de geoprocessamento, como interpolações e álgebra de mapas, na modelagem matemática da erosão laminar pressupõe a validação dos dados através da geração de informações coletadas em campo, a fim de calibrar o modelo elaborado pelo geoprocessamento com os parâmetros da USLE (Baptista, *op. cit.*).

Salienta-se também, que o método USLE atende apenas ao levantamento de áreas suscetíveis à erosão laminar, enquanto os focos de erosão linear devem ser identificados com base em outros critérios, como curvatura e declividade das vertentes, textura e granulometria do material inconsolidado e as formas de uso e ocupação do solo.

Segundo Bertoni & Lombardi Neto (1993) *apud* Baptista (2003), a erosividade é o resultado da combinação entre a energia cinética da chuva e sua intensidade máxima em 30 min. (I_{30}), expressa por:

$$Ec = 0,119 + 0,0873 \cdot \log I \quad (4)$$

Onde:

Ec = energia cinética em MJ/ha.mm;

I = intensidade do evento pluviométrico em mm/h

Em função da dificuldade de se obter registro de intensidade de chuva (registros de pluviógrafos), o cálculo da erosividade pode ser obtido com o uso de dados pluviométricos como o coeficiente de chuvas (5) e equações de regressão obtidas na bibliografia para a estimativa do índice de erosividade.

Segundo Bertoni & Lombardi Neto (1990), Wischmeier (1959) concluiu que o melhor estimador para o fator R seria a energia cinética da chuva (E) com intensidade (I) máxima de 30 minutos (EI_{30}), expressa por 6.

Outros autores (Lopes e Brito, 1993 e Bertoni & Lombardi Neto, 1993) confirmam em diversos estudos que esse índice é o que mais se adequa a realidade intertropical (Baptista, 2003).

$$EI_m = p^2/P \quad (5)$$

Onde:

EI_m = coeficiente de chuva média mensal em mm;

p = precipitação média mensal em mm;

P = precipitação média anual em mm.

$$EI_{30} = 67,355 (EI_m)^{0,85} \quad (6)$$

Onde:

EI_{30} = média mensal do índice de erosividade em MJ.mm/(ha.h);

Segundo Carvalho *et. al.* (2004), Lombardi Neto (1977) estabeleceu como critério para a seleção das chuvas individuais erosivas, todas de 10,0mm ou mais, ou aquelas menores do que isso, mas que proporcionaram significativas enxurradas

A erosividade média anual é maior quanto maior a precipitação média anual e quanto maior for a variabilidade da chuva ao longo do ano. Nas regiões tropicais, mais de 40% das chuvas são consideradas erosivas, enquanto nas regiões de clima temperado, esse percentual é em torno de 5% (Waltrick, 2010).

Com isso, denota-se que a Serra de Baturité, um enclave subúmido no semiárido nordestino, que por definição, é uma zona de ocorrência de chuvas irregulares e intensas, apresenta grande potencial de ocorrência de chuvas erosivas.

Carvalho (1994) propôs uma hierarquização dos índices de erosividade em tm.mm.ha.ano, conforme o Quadro 11. A conversão do sistema internacional

(MJ.mm/ha.h) para esse sistema métrico é feita pela divisão dos valores de erosividade por 9,81(Alves e Azevedo, 2013).

Tradicionalmente, os levantamentos de erosividade usam dados pluviométricos fornecidos diretamente de estações pluviométricas, muitas delas disponíveis na internet. Esses dados são inseridos em planilhas eletrônicas e calculadas as somas e médias pluviométricas.

Quadro 11 – Classes de erosividade da chuva média anual

Classes de Erosividade	Valores de R (tm.mm / ha.ano)
1 – Muito Baixa	R < 250
2 – Baixa	250 < R < 500
3 – Média	500 < R < 750
4 – Alta	750 < R 1000
5 – Muito Alta	R > 1000

Fonte: Adaptado de Carvalho (1994) *apud* Paes (2004).

Posteriormente, os resultados são inseridos nas equações de regressão e determinados os índices de erosividade que são apresentados em tabelas, gráficos ou espacializados através de interpolação.

Neste trabalho, optou-se por outra alternativa metodológica com os dados pluviométricos usados na determinação do coeficientes de chuva sendo obtidos a partir dos dados disponibilizados gratuitamente pela organização internacional *Worldclim – Global Climate Date*, em seu site na internet (www.worldclim.org) ou através da página da AMBDATA, (<http://www.dpi.inpe.br/Ambdata/index.php>), da Divisão de Processamento de Imagens (DPI), do INPE.

Esses dados incluem variáveis de temperatura média, máxima e mínima, além de precipitações e variáveis bioclimáticas abrangendo o período entre 1950 a 2000 interpolados em arquivos *raster* ESRIGRID com uma resolução espacial de 30 arco-segundos (~1km).

Os dados das estações climatológicas no mundo de onde se originam as informações climáticas necessárias á espacialização advêm de séries históricas mínimas de dez anos de registro (Sá Junior, 2009).

Os dados referentes ao Brasil foram obtidos por meio da rede nacional de observações meteorológicas de superfície do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) em dados das Normais Climatológicas (1961-1990).

Esses dados são gerados a partir da interpolação pelo método *Thin Plate Spline* (TPS) dos dados históricos de 47.554 estações pluviométricas, 24.542 estações com medidas de temperatura média, 14.835 estações com medidas de temperatura máxima e mínima dispersas por todo o globo com variáveis independentes de latitude, longitude e com os dados altimétricos dos arquivos SRTM. (Hijmans et. al.. 2005).

Notou-se uma grande correlação entre os dados pluviométricos do *Worldclim* com os disponibilizados por outras instituições como CPRM e FUNCEME, o que permite assegurar boa confiabilidade desses dados aos serem submetidos aos procedimentos acima mencionados.

Como os arquivos *Worldclim* são imagens resultantes de interpolação de dados pluviométricos, todas as etapas matemáticas para o cálculo de erosividade puderam ser realizadas diretamente em ambiente SIG através de álgebra de mapas.

3.4.3 Geoprocessamento

Esta etapa consistiu na elaboração do material cartográfico através do tratamento dos produtos de sensoriamento remoto, com o uso do software ENVI 4.5, para filtragens das imagens orbitais e da aplicação de diversas técnicas de geoprocessamento e cartografia digital em SIG (Sistema de Informação Geográfica) elaborada na plataforma ArcGIS 9.3, incluindo álgebra de mapas, interpolação e análise espacial.

Adotou-se como base cartográfica as cartas topográficas da DSG/SUDENE - Folhas Baturité SB.24-X-A-I e Canindé SB.24-V-B-III, georreferenciadas no software ArcGIS 9.3 em sistema de coordenadas UTM e datum Córrego Alegre e posteriormente reprojetadas para o datum WGS-84.

3.4.3.1 Produtos de Sensoriamento Remoto

As técnicas de sensoriamento remoto (SR) adotadas neste trabalho consistiram no tratamento e interpretação das imagens orbitais, entre elas:

georreferenciamento, aplicação de técnicas de realce, contraste, composição colorida *RGB*, fusão de bandas e filtragem de freqüências espectrais.

Como mencionado anteriormente, foram utilizadas imagens do sensore ETM-Landsat e do sensor SAR da missão SRTM. O primeiro trata-se de um sensor óptico, enquanto o SRTM consiste num sistema de radar interferométrico de abertura sintética (*SAR - synthetic aperture radar*) com resolução espacial de 3 arco-segundos (90 metros).

Os dados SRTM têm grande aplicabilidade na confecção de Modelos Digitais de Elevação (MDE) e na obtenção de dados topográficos. Neste trabalho, utilizou-se os dados SRTM reamostrados pelo projeto TOPODATA, do INPE.

Esse projeto visa o cálculo e oferta de variáveis geomorfométricas locais a partir de dados SRTM e consistiu num trabalho de refinamento dos dados SRTM por coeficientes geoestatísticos através do método de *krigagem*, com otimização da resolução espacial original dos arquivos para 1 arco-segundo (30 metros) para todo o território nacional (Valeriano, 2008).

Essa abordagem não irá aumentar o nível de detalhe do modelo resultante, porém resultará em uma superfície com coerência de suas propriedades angulares (p.ex., declividade, orientação de vertentes etc) entre as células vizinhas, fator importante em análise morfométrica (Grohmann *et. al.*, 2008).

O projeto incluiu entre seus produtos as variáveis declividade, orientação de vertentes, curvatura horizontal, curvatura vertical e insumos para o delineamento da estrutura de drenagem.

Tanto as imagens LANDSAT como os produtos do TOPODATA podem ser adquiridos gratuitamente no site do INPE, nas páginas <http://www.dgi.inpe.br/CDSR/> e <http://www.dsr.inpe.br/topodata/index.php>, respectivamente.

A sinergia entre dados ópticos e de radar em trabalhos de avaliação e monitoramento dos elementos ambientais, incluindo os trabalhos de mapeamento geotécnico, produzem resultados animadores e oferecem contribuições significativas para técnicos, pesquisadores e gestores públicos no que diz respeito a planejamento e a tomada de decisões.

É possível aproveitar os fatores positivos de cada sistema na elaboração de produtos com maior quantidade de informações, pois os dados por eles registrados apresentam naturezas distintas e complementares.

Logo, o seu uso combinado pode ser altamente favorável, pois as imagens de SAR tendem a enfatizar a informação espacial (estruturas e texturas), enquanto as imagens ópticas realçam a informação espectral (Chaves et. al., 2003).

Destaca-se a importância da técnica de filtragem de frequências espectrais para os estudos geológicos e geotécnicos, que pode ser realizada tanto em produtos ópticos como de radar. Essa técnica consiste em realçar estruturas de baixa, média ou alta frequência nas imagens de sensoriamento remoto.

As feições de baixa frequência numa imagem de satélite variam gradativamente com a distância, sendo menos perceptíveis ao usuário de SR que feições de alta frequência.

As feições de alta frequência são caracterizadas por uma brusca variação dos níveis de cinza (DN's) da imagem, como os contatos litológicos, as redes de drenagem e estruturas geológicas como falhas e fraturas.

Através da operação matemática conhecida por convolução, que opera no domínio espacial de uma imagem, é possível implementar três tipos de filtros: filtro passa baixa, que realça as informações de baixa freqüência; filtro passa alta, que realça as informações de alta freqüência e filtros direcionais, para o realce de bordas em direções pré-definidas. (Crosta, 1992 apud Pinéo, 2005)

Tais filtros atribuem valores de nível de cinza para os *pixels* da cena original em relação a uma média ponderada dos *pixels* vizinhos no realce de bordas em direções pré-definidas (Klein, 1998).

O ENVI 4.5 possui recursos de edição de vetorização dos lineamentos extraídos com a filtragem de alta freqüência e posterior exportação das feições em formato DXF e SHP ou das imagens previamente filtradas (Pinéo, op. cit.)

A direção em azimute e o comprimento em metros dos vetores correspondentes aos lineamentos foram medidos para posterior geração de um diagrama de rosetas e visualização do *trend* regional destas estruturas e elaboração de mapa de densidade de lineamentos.

A importância da aplicação de filtros de freqüência espectrais consiste, portanto, em quantificar e qualificar essas estruturas geológicas e geomorfológicas, que estão entre os componentes principais de condicionantes de movimentos de massa e erosão.

3.4.3.1.1 Dados de Sensoriamento Óptico

Inicialmente, o sensor ETM-Landsat foi utilizado para a vetorização de estradas, drenagens e áreas urbanas na região de estudo em composição das bandas do infravermelho médio, infravermelho próximo e vermelho (RGB).

Outra aplicação do sensor óptico foi através do ETM-Landsat a partir do tratamento da banda NIR da cena utilizada com a aplicação de filtros *High-Pass* tipo *Kernel* para a identificação de feições estruturais lineares.

3.4.3.1.2 Dados de Sensoriamento de Radar

A utilização de dados de sensoriamento de radar neste trabalho se deu através da aplicação da filtragem de direcional implementada nas imagens SRTM que permitiram a identificação de feições lineares, como zonas de cisalhamento, falhas e juntas, bem como redes de drenagem e alinhamentos de cristas e divisores topográficos.

Os dados do radar SRTM refinados pelo projeto TOPODATA utilizados neste trabalho, refinados pelo projeto TOPODATA, permitiram a elaboração de diversos produtos essenciais para o mapeamento geotécnico e definição dos condicionantes geológico-geomorfológicos de movimentos de massa e erosão.

Entre as variáveis geomorfométricas possíveis de elaboração a partir dos arquivos disponibilizados pelo TOPODATA, constam a declividade e orientação, curvatura vertical e horizontal das vertentes, que foram classificadas em arquivos *raster* para a geração de mapas não-numéricos. Tais variáveis correspondem aos elementos básicos sobre os quais se fundamentam as técnicas de interpretação e análise do relevo (Valeriano, 2008).

Esses arquivos estão disponíveis num extenso banco de dados estruturados em planos de informação de folhas articuladas em escalas 1:250.000 de todo o território nacional nos seguintes formatos: GeoTiff, ASCII, Idrisi 2.0 e BMP e separados nas diferentes variáveis, como mostra o Quadro 12.

A manipulação dos arquivos em SIG precede o conhecimento de aspectos prévios à sua obtenção, como as características dos dados e suas relações com propriedades do terreno, além dos conceitos e métodos envolvidos nas derivações e, por fim, formas adequadas de representação (Valeriano, *op. cit.*).

Tais instruções e conceitos podem ser obtidos na própria página do TOPODATA, no endereço <http://www.dsr.inpe.br/topodata/documentos.php>, onde se tem acesso a documentos oficiais do projeto, como o Guia de Utilização, que instrui sobre o uso adequado dos planos de informações classificados em ambiente SIG.

A geração de mapas não-numéricos a partir dos planos de informação obtidos pelo TOPODATA requer a manipulação de algumas técnicas de geoprocessamento, disponibilizadas no software ArcGIS 9.3, pelo conjunto de ferramentas *ArcToolBox*.

Quadro 12 – Variáveis geomorfométricas disponíveis pelo projeto TOPODATA.

Variável	Arquivos
Altitude - numérica	__ZN_tf.zip
Declividade - numérica	__SN_tf.zip
Orientação - numérica	__ON_tf.zip
Curvatura Vertical - numérica	__VN_tf.zip
Curvatura Horizontal - numérica	__HN_tf.zip
Declividade - classes	__SA_tf.zip
Declividade - classes	__SB_tf.zip
Declividade - classes	__SC_tf.zip
Orientação - octantes	__OC_tf.zip
Curvatura Vertical - 3 classes	__V3_tf.zip
Curvatura Vertical - 5 classes	__V5_tf.zip
Curvatura Horizontal - 3 classes	__H3_tf.zip
Curvatura Horizontal - 5 classes	__H5_tf.zip
Forma de terreno - classes	__FT_tf.zip
ADD – divisores e talvegues	__DD_tf.zip

Fonte: Valeriano (2008)

O arquivo __SN (Quadro 10) representa a variável declividade em formato numérico, enquanto os arquivos __SA, __SB e __SC representam a declividade dividida em categorias ou classes, de acordo com as metodologias de Marques (1971), Lepsch (1991) e EMBRAPA (1999) (Valeriano, 2008).

3.4.3.2 Cartografia

3.4.3.2.1 Base Cartográfica

Após o georreferenciamento e reprojeção da base cartográfica em sistema de coordenadas UTM, *datum* WGS-84, procedeu-se a sua atualização através de vetorização de corpos hídricos, drenagens, áreas urbanas, estradas e toponímia a partir da imagem ETM-LANDSAT, e do Mapa Rodoviário do Ceará (DER, 2011), também georreferenciados em WGS-84 para a confecção de um mapa a ser utilizado nos trabalhos de campo e para servir de base planialtimétrica da área de estudo.

A base cartográfica utilizada na geração do dados planialtimétricos foi obtida, além da imagem ETM-LANDSAT, a partir das Folhas Baturité SB.24-X-A-I e Canindé SB.24-V-B-III, da SUDENE, e nos dados altimétricos das imagens SRTM, com a geração de isovalor de altimetria no *Spatial Analyst*, do ArcGIS 9.3, opção *Contour*.

A cada etapa de campo eram plotados num mapa de campo os pontos de parada de observação e de coleta de amostras, com as respectivas descrições sobre geologia, geomorfologia e materiais inconsolidados. Esses dados subsidiaram a elaboração do mapeamento geotécnico da região.

3.4.3.2.2 Cartografia Geotécnica

Como mencionado no capítulo anterior, o mapeamento geotécnico adotado neste trabalho baseou-se na sistemática da EESC/USP, que tem como fundamentos a compartimentação do terreno, onde são discriminados e avaliados os atributos dos componentes do meio ambiente e a hierarquização dos documentos cartográficos em categorias de acordo com a escala e o grau de detalhamento desejado.

No presente trabalho, os documentos cartográficos gerados corresponderam até o nível IV da proposta de Zugue e Gandolfi (2004). Os produtos gerados foram os seguintes:

- Nível I – Documentos Fundamentais Básicos – Mapas de Lineamentos Estruturais, Substrato Rochoso, Hipsométrico, Declividade, Curvaturas Vertical e Horizontal das Vertentes, Orientação das Vertentes, Feições do Terreno, Pedologia e Pluviométrico.
- Nível II – Documentos Fundamentais de Síntese – Carta de Zoneamento Geotécnico Geral (CZGG)
- Nível III – Cartas Derivadas e Interpretativas – Erosividade, Erodibilidade e Suscetibilidade a Movimentos de Massa.
- Nível IV – Cartas Analíticas Básicas – Risco para Obras Viárias

Os produtos do Nível I representam a variação espacial dos atributos necessários ao mapeamento geotécnico, o Nível II representa produtos que têm como objetivo agregar num único documento os atributos geotécnicos de uma região.

A distinção principal entre os produtos do Nível II é que mapas de zoneamento geotécnico apresentam informações mais simplificadas e homogêneas que os mapas de condições geotécnicas, que se caracterizam por comportar informações de vários documentos fundamentais básicos numa percepção mais efetiva das zonas de ocorrência das informações (Zuguete e Gandolfi, 2004).

As Cartas Derivadas e Interpretativas do Nível III consistem em produtos que apresentem a síntese ou análise de um conjunto de atributos de uso direto para diferentes situações. É o resultado de uma análise específica com base nos Documentos Fundamentais.

As Cartas Analíticas Básicas são elaboradas a partir de um conjunto de informações sobre os componentes básicos relacionados à probabilidade de ocorrência de um ou mais processos naturais.

3.4.3.2.2.1 Documentos Fundamentais Básicos

O mapa do Substrato Rochoso mostra as principais unidades litológicas que ocorrem na área de estudo de acordo com o mapa geológico do Ceará, publicado pela CPRM (2003).

É o resultado da compilação dos mapas geológicos utilizados na pesquisa cartográfica da área de estudo com os dados de levantamento de campo realizados

durante a pesquisa e com os dados de lineamentos estruturais levantados neste trabalho.

O Mapa de Lineamentos Estruturais apresenta as principais estruturas geológicas como lineamentos, falhas e zonas de cisalhamento obtidas através de filtragem de frequências espectrais e interpretação visual em imagens Landsat e SRTM de vasta área adjacente à Serra de Baturité.

O referido mapa mostra, ainda, a contextualização geológico-estrutural da área de estudo na porção nordeste do Domínio Ceará Central (DCC), onde está inserida, e ainda alguns subprodutos, como os mapas de densidade de lineamentos.

Foram identificadas e mapeadas as unidades litológicas observando aspectos como profundidade/espessura, descontinuidades, distribuição e grau de alteração (intemperização).

As estruturas lineares foram obtidas através da aplicação de filtros direcionais na imagem SRTM e de filtros passa-altas (*high-pass*) na imagem ETM-LANDSAT do Maciço de Baturité.

Foram aplicados filtros direcionais do tipo Kernel 5 X 5 em diferentes azimutes (0°, 45°, 90°, 135°, 180°, 225°, 270°, 315°) com o intuito de destacar os lineamentos estruturais de diferentes direções que ocorrem na região e filtros high-pass Kernel 3 x 3 na banda 04 (NIR – Infravermelho próximo) da cena ETM Landsat.

Os filtros direcionais promovem o ressalto das estruturas lineares que se encontram em direção perpendicular à direção do filtro e a banda 04 do sensor Landsat apresenta sensibilidade à morfologia do terreno, e serve para a análise e mapeamento de feições geológicas e estruturais (Santos, 2010).

As imagens de saída foram exportadas em formato GeoTiff e sobre elas foram vetorizados em formato *shapefile* (shp.), os lineamentos estruturais.

O mapa Hipsométrico foi elaborado a partir do arquivo *raster* ____ZN dos *layers* do TOPODATA, nos quais é possível o fatiamento em cotas altimétricas com a ferramenta *Classify*, do *Spatial Analyst Tools*, no ArcGIS 9.3.

Na geração do mapa de Declividade neste trabalho, optou-se pelo uso do arquivo ____SN, que por se tratar de um arquivo *raster* de dados contínuos, permite sua reclassificação em intervalos definidos pelo usuário com um número específico de classes.

Neste caso, foram adaptados os critérios da caracterização das unidades de relevo da metodologia do IPT (1981) com classes de declividade de intervalos de 0 – 5%, 5,1 – 15%, 15,1 – 30%, 30,1 - 45% e > 45%, conforme o quadro 13.

Quadro 13 – Critérios utilizados na classificação das unidades de relevo

Critério	Categoria	Intervalo	Conceito
Amplitude Local	Pequena	0-100 m	Altura máxima da unidade em metros, acima do assoalho dos grandes vales adjacentes
	Média	100-300 m	
	Grande	> 300	
Declividade	Muito Baixa	0-5%	Inclinação media do perfil da encosta, expressa em porcentagem
	Baixa	5-15%	
	Média	15-30%	
	Alta	30-45%	
	Muito Alta	> 45%	
Densidade de Drenagem	Baixa	0-05	Números de cursos d'água perenes
	Média	5-30	numa área de 10 km ²
	Alta	> 30	
Expressão de Colinas em áreas	Pequenas	< 1 km ²	Área ocupada pelas unidades de relevos entre seus vales limítrofes,
	Medias	1-4 km ²	ou seja, área dos interflúvios
	Amplas	> 4 km ²	
Topos	Extensos		Convencional
	Restritos		
Formas de Topos	Aplainados		Convencional
	Arredondados		
	Angulosos		
Perfil das Vertentes	Convexo		Convencional
	Retilíneo		
	Côncavo		
Padrão de Drenagem	Dendritico		
	Paralelo		
	Retangular		
	Pinulado		
	Em treliça		
Vales	Abertos		Convencional
	Fechados		

Planícies Aluvionares Interiores	Desenvolvidas Restritas		Convencional
Existência de Drenagem Fechada	Presente Ausente		Ocorrência de lagoas perenes ou intermitentes
Existência de Ravinamento das Vertentes	Presente Ausente		Convencional

Fonte: IPT (1981).

Os Mapas Curvatura Vertical, Curvatura Horizontal e Orientação das Vertentes foram confeccionados diretamente com os dados disponibilizados pelo TOPODATA, através dos arquivos __V5, __H5 e __O5, respectivamente.

Com base nos trabalhos de Bétard, Sales e Peulvast (2007), Bastos (2012), nos levantamentos de campo e na interpretação de imagens de satélite, particularmente das imagens SRTM, foram feitos os mapas de geomorfologia (em escala de unidades geomorfológicas) e de Pedologia.

O mapa das Feições do Terreno foi obtido a partir do cruzamento do mapa de Unidades de Relevo, elaborado segundo hierarquia do IPT (1981), como mostra o Quadro14, e Zuquette & Gandolfi (2004) com o mapa de Modelados, parte da taxonomia geomorfológica proposta pelo IBGE (2009), onde a hierarquia de mapeamento divide-se em Domínio Morfoestrutural, Regiões Geomorfológicas, Compartimentos do Relevo e Modelados (Formas do Relevo).

Segundo Zuquette & Gandolfi (2004), avaliação do terreno para elaboração de um mapa de feições do terreno pode se basear no enfoque fisiográfico (*landscape approach*) ou no enfoque paramétrico (*parametric approach*).

O primeiro consiste na delimitação das feições a partir de fotointerpretação e pesquisa de campo, enquanto o segundo enfoque zoneia o terreno a partir de critérios morfométricos.

Dessa forma, com o uso do mapa de Unidades de Relevo e o de Modelados, criados a partir de critérios morfométricos e morfográficos, como declividade, altimetria e curvatura das vertentes, foi construído o mapa de Feições do Terreno.

Quadro 14 – Níveis hierárquicos do zoneamento das feições do relevo

Tipo	Nível Hierárquico	Descrição
Sistema de Relevo	Superior	Distingue numa dada região, áreas cujos atributos físicos como topografia, solos e vegetação, correlacionados com geologia, geomorfologia e clima sejam distintos das áreas adjacentes.
Unidade de Relevo	Intermediário	Ocorre quase sempre sobre um único tipo de rochas ou depósito superficial e encerra solos cuja variação, se não é desprezível é pelo menos consistente. Como exemplos, podemos citar: as escarpas, morros, leques aluviais e colinas.
Elemento de Relevo	Inferior	São as menores partes que compõem as unidades, por exemplo, a crista, o flanco e o sopé de uma escarpa são três elementos de relevo.

Fonte: IPT (1981).

O mapa Pluviométrico foi elaborado a partir dos dados disponibilizados pelo *Worldclim* – *Global Climate Date* (www.worldclim.org). Ao interpolar espacialmente essas variáveis com os dados pluviométricos e de temperatura das estações espalhadas pelo globo, o projeto *Worldclim* gerou grades regulares chamadas de “superfícies climáticas”.

O resultado dessa operação foi a geração de 13 zonas climáticas sobrepostas em pelo menos 15º para garantir uma transição suave entre as camadas de informação (Hijmans *et al.*, 2005, Sá Junior, 2009).

Isso permitiu a elaboração de mapas pluviométricos com classes de intervalos regulares de pluviosidade utilizando o mesmo procedimento para a elaboração do mapa de declividade, com o recurso *Reclassify* do *Spatial Analyst*, no ArcGis 9.3.

3.4.3.2.2.2 Documentos Fundamentais de Síntese

A carta de Zoneamento Geotécnico Geral (CZGG) foi elaborada a partir do cruzamento das informações dos seguintes Documentos Fundamentais Básicos:

Substrato Rochoso, Topográfico, Declividade, Pedologia, Unidades de Relevo, Feições do Terreno, Lineamentos Estruturais, Erosividade e Erodibilidade.

Esses documentos foram sobrepostos de dois a dois em ambiente SIG segundo o método de Sobreposição Controlada, onde cada sobreposição é feita apenas após controle e avaliação da sobreposição anterior a fim de garantir a confiabilidade nos resultados (Zuquette e Gandolfi, 2004).

3.4.3.2.2.3 Cartas Derivadas e Interpretativas

O mapa de Erosividade resultou da aplicação do coeficiente de chuvas e das equações de regressão El_{30} nos arquivos *raster* de pluviometria mensal e anual dos produtos *Wordclim* diretamente em ambiente SIG. Nessa operação foram usadas as ferramentas *Raster Calculator* e *Power*, do *ArcToolBox*, no ArcGIS 9.3.

Os mapas de Erodibilidade foram elaborados a partir dos dados obtidos no levantamento de campo e processamento dos ensaios de laboratório e a partir de dados bibliográficos para as respectivas classes de solo que ocorrem na região de estudo.

No primeiro caso, os dados de campo foram sobrepostos como pontos ao mapa de erodibilidade feito com base na literatura para efeito comparativo, e no segundo, foi feita a reclassificação das classes de solo adotando as taxas de erodibilidade obtidas na literatura adicionando-as à tabela de atributos do arquivo *shapefile* das classes de solo.

O mapa de Suscetibilidade a Movimentos de Massa foi feito com a sobreposição dos mapas de densidade de lineamentos estruturais, Substrato Rochoso, Declividade e Curvatura Horizontal e Vertical das vertentes com a ferramenta *Weighted Overlay*, do *Spatial Analyst Tools*, no ArcGis 9.3.

3.4.3.2.2.4 Cartas Analíticas Básicas

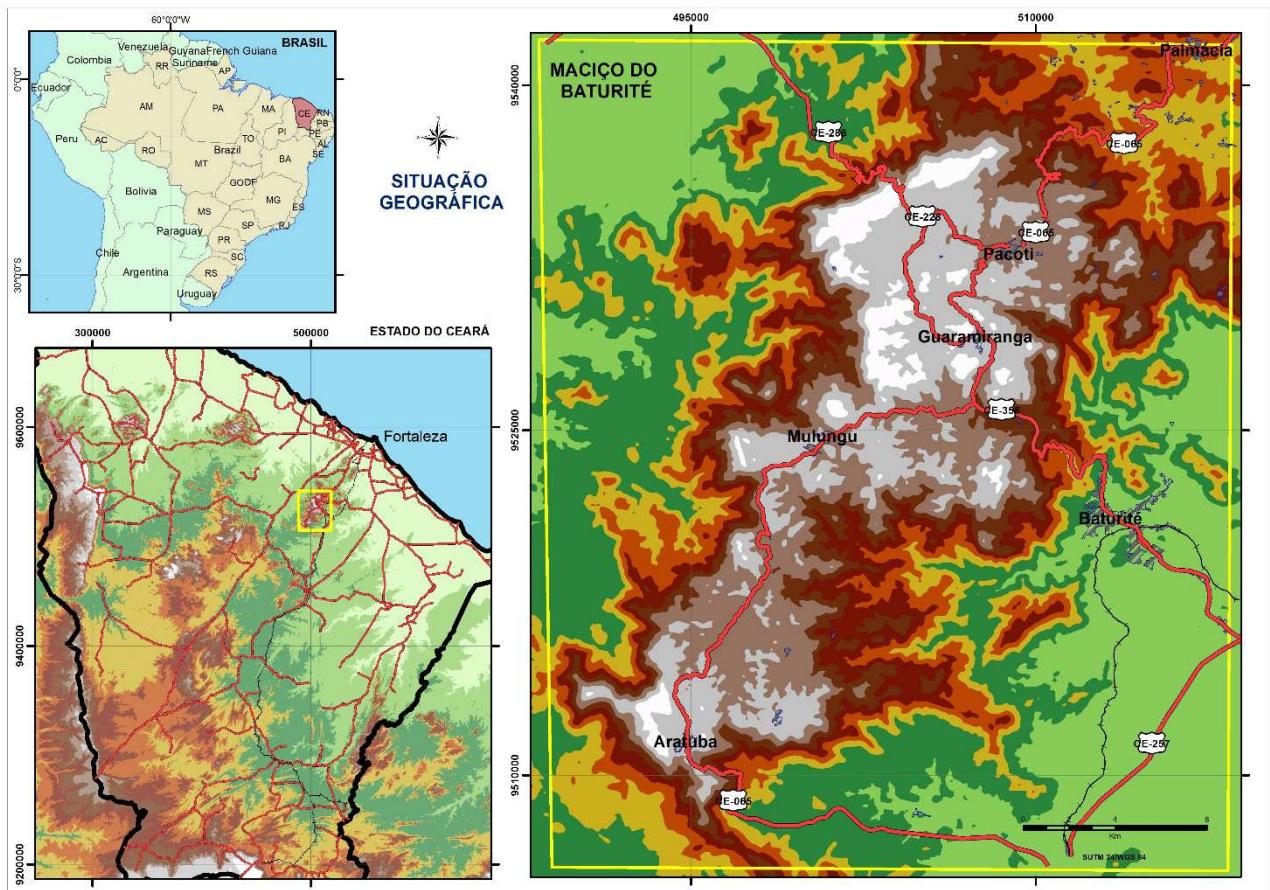
O mapa de Risco para Obras Viárias foi feito com base nas informações de estruturas geológicas, (falhas, fraturas e foliações) bem como nas litologias, declividades e orientação das vertentes. Essas informações foram sobrepostas e sobre elas realizada a álgebra de mapas com a ferramenta *Weighted Overlay*, do *Spatial Analyst Tools*, no ArcGis 9.3.

4 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

4.1 Localização e Acesso

A Serra de Baturité abrange parte dos municípios de Aratuba, Baturité, Canindé, Capistrano, Caridade, Guaramiranga, Mulungu, Pacoti, Palmácia e Redenção. Fica à aproximadamente 90 km de Fortaleza e o acesso a partir da capital estadual pode ser feito pela CE-060, sentido Pacatuba-Baturité ou pela CE-065, sentido Maranguape-Palmácia. A área da pesquisa abrange uma área de aproximadamente 1.000 (um mil) km² (Figura 08).

Figura 08 – Situação Geográfica da Área de Estudo



Fonte: Elaborado pelo Autor

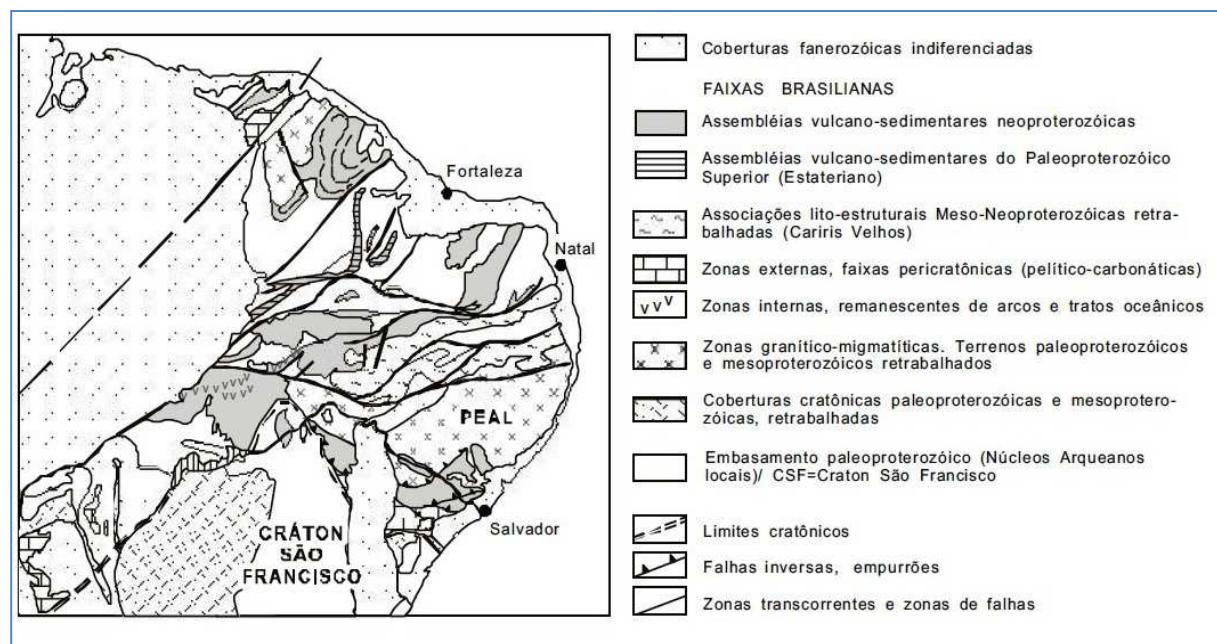
4.2 Aspectos Fisiográficos

4.2.1 – Geologia

A área desta pesquisa está inserida geologicamente na Província Borborema (Almeida *et al.*, 1977), na sua porção setentrional (acima do lineamento de Patos), dentro dos limites do Domínio Ceará Central (Arthaud, 2007).

A Província Borborema (Figura 09) é hoje concebida como uma entidade geotectônica formada pela superposição de mais de uma orogênese ao longo do tempo, que foram responsáveis pela ocorrência de faixas supracrustais monocíclicas ou policíclicas e pela aglutinação de terrenos alóctones de origens diferentes e separadas por grandes zonas de cisalhamento (Jardim de Sá, 1994). Expressivos plutonismos granitóides também caracterizam essa região (Medeiros, 2004).

Figura 09 – Regiões da Província Borborema



Fonte: Brito Neves *et. al.* (2000).

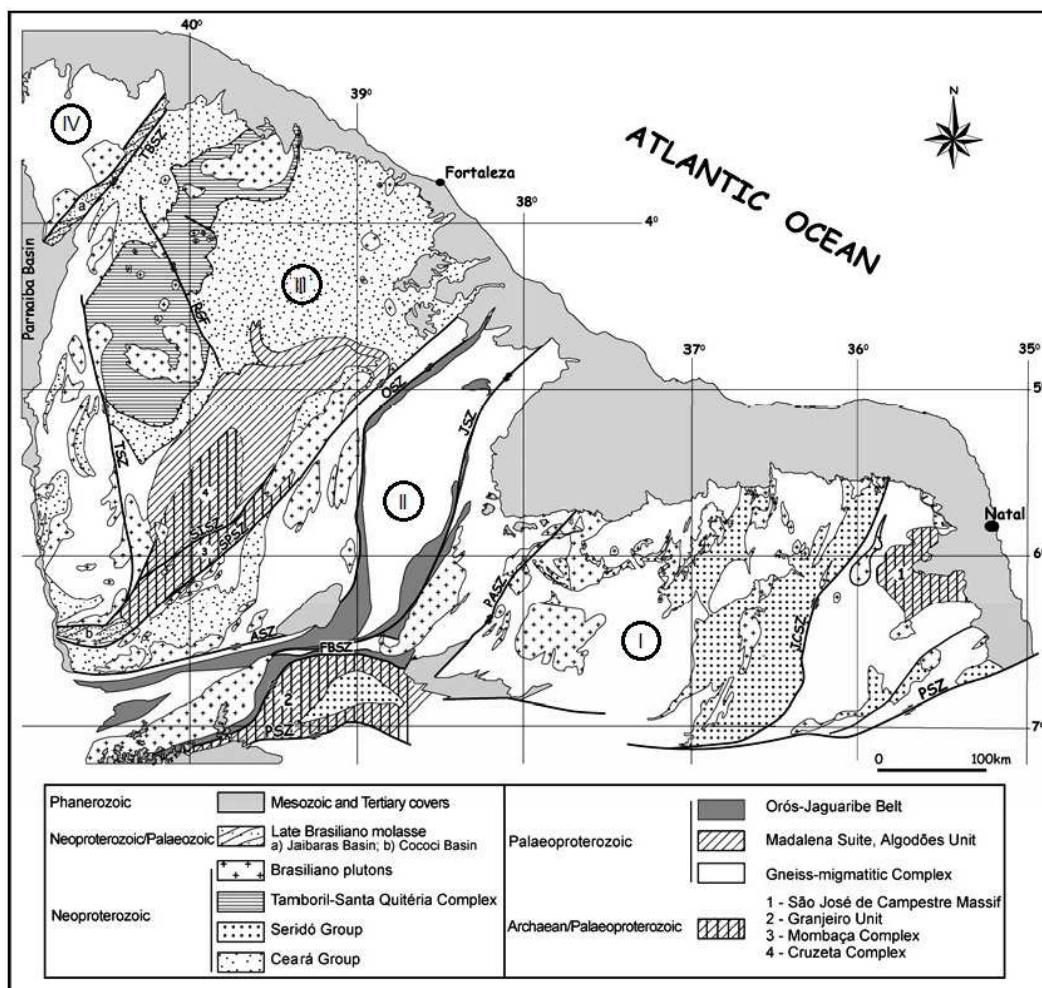
No caso das faixas monocíclicas, essas teriam sido afetadas apenas pela orogênese Brasiliana (700 a 450 m.a), enquanto as faixas policíclicas teriam sido afetadas por orogênese pré-brasilianas, como a Transamazônica ou a Cariris Velhos/Kibariana (Medeiros, 2004).

Nas últimas décadas, o emprego mais frequente das datações U-Pb em zircão em Sm/Nd em rocha total forneceram informações geocronológicas que contribuíram decisivamente para a tese de uma Província Borborema separada em terrenos de origem alóctone, tendo como base o conceito de terrenos suspeitos de Coney *et al* (1980), empregado na Cordilheira Americana (Oliveira, 2008).

As extensas zonas de cisalhamento de regime predominantemente transcorrente dividem a Província Borborema em três segmentos tectônicos, denominados Subprovíncia Setentrional, Subprovíncia Transversal e Subprovíncia Meridional (CPRM, 2003).

A subprovíncia Setentrional (Figura 10) abrange os domínios tectônicos do Noroeste Ceará (ou Médio Coreaú), Ceará Central, Orós-Jaguaribe e Rio Grande do Norte (Arthaud, 2007).

Figura 10 – Subprovíncia Borborema Setentrional. I – Domínio Rio Grande do Norte, II – Domínio Orós-Jaguaribe, III – Domínio Ceará Central e IV – Domínio Noroeste Ceará.



Fonte: Arthaud (2007).

Esses domínios tectônicos teriam sido conjuntamente amalgados e sofrido deformação e magmatismo durante a orogênese relacionada ao Ciclo Brasiliano, no Neoproterozóico Superior, que formou o Supercontinente Gondwana (Carvalho 2003, Oliveira, 2008), como resultado da colisão entre os cráticos São Luís/Oeste Africano e São Francisco/Congo há cerca de 600 M.a. (Arthaud, 2007).

O Domínio Ceará Central (Figura 11) limita-se a norte pelo Lineamento Sobral - Pedro II, e a sul, pela Zona de Cizalhamento Orós Oeste-Auiaba. Ao norte, faz fronteira com o Domínio do Médio Coreaú, a leste com a Província Sedimentar da Parnaíba, e a leste a sul, com o Domínio Orós-Jaguaribe. (CPRM, 2003).

De acordo com Silva (2007), em trabalhos precursores de Brito Neves (1975, 1978), Santos & Brito Neves (1984) e Santos *et al* (1984) esse domínio estrutural recebeu as denominações de Maciço Gnáissico-Migmatítico de Tróia e Santa Quitéria, Sistema de Dobramentos Jaguaribeano e Rio Curu-Independência.

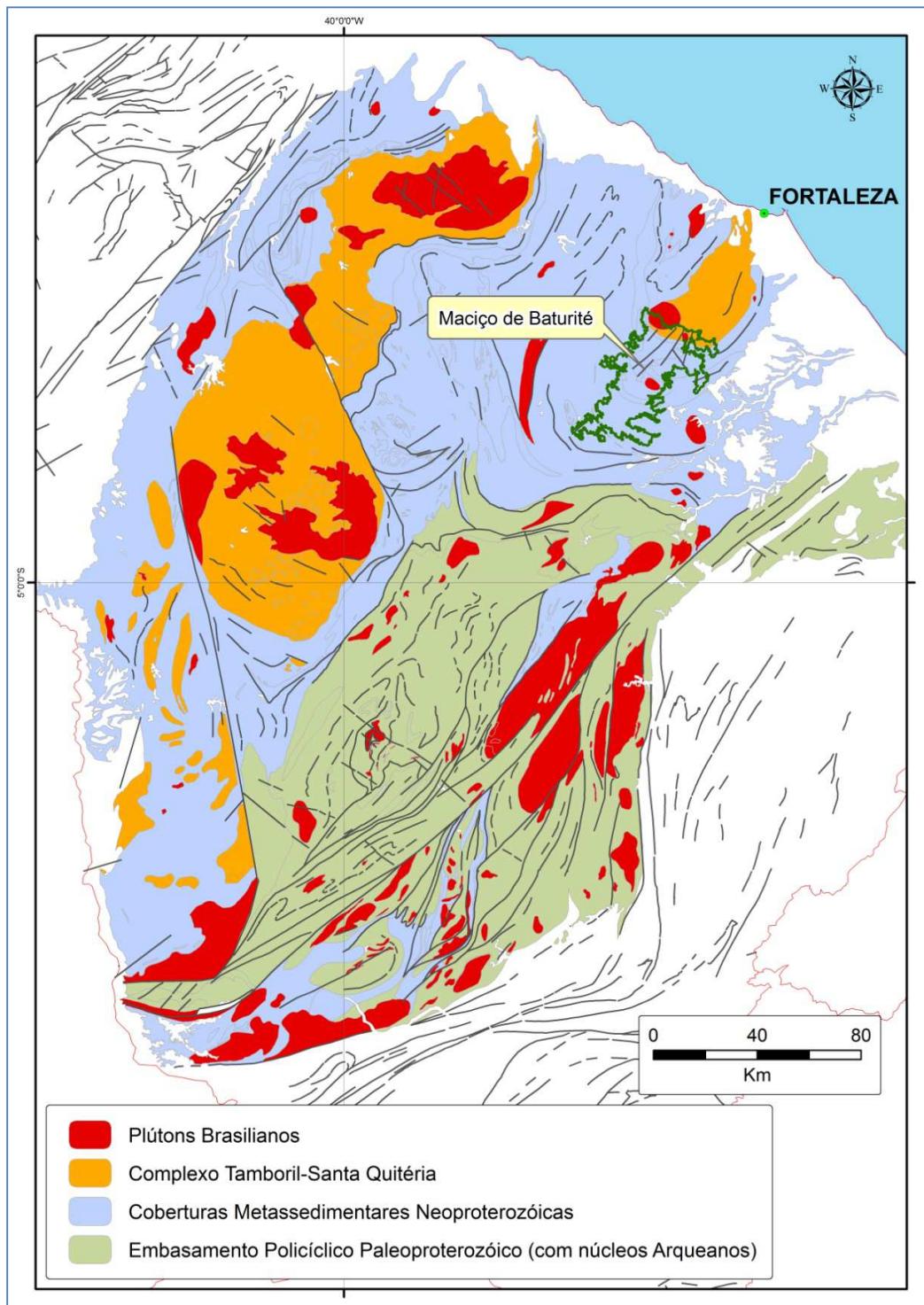
Segundo Arthaud (*op.cit*), o Domínio Ceará Central (DCC), pode ser subdividido em cinco conjuntos: embasamento policíclico (paleoproterozóico com núcleos arqueanos), coberturas metassedimentares (neoproterozóicas), complexo anatético-ígneos brasileiros (Tamboril-Santa Quitéria), granitos brasileiros (plútões) e molassas tardio-brasilienses.

O DCC se caracteriza por grandes *nappes* recumbentes bem preservadas que envolvem o embasamento policíclico e as rochas supracrustais, apresentando um metamorfismo de alta pressão associado ao empilhamento dos *nappes* ocorrendo evolução do conjunto para um metamorfismo de alta temperatura com descompressão do *nappes*, enquanto condições de pressões mais baixas afetaram o embasamento para-autóctone (Arthaud *et al*, 1998).

A área de pesquisa desta tese está inserida no conjunto das supracrustais metassedimentares neoproterozóicas, que envolve o Grupo Ceará e suas sub-unidades (Independência, Canindé, Quixeramobim e Arneiroz) e a Unidade Acopiara.

Diversos autores já realizaram trabalhos na mesma área, onde adotaram termos diferentes em seus estudos para as unidades geológicas encontradas na região, entre eles, destacam-se: Braga *et al* (1977), Cavalcante *et al* (2003), Fetter, (1999), Bizzi *et al* (2001), Torres (2004), além de projeto da Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM), realizado por Brandão (1995) que cobriu parte da região do Maciço de Baturité.

Figura 11 – Maciço de Baturité no contexto do Domínio Ceará Central e seus agrupamentos tectônicos.



Fonte: Adaptado de Arthaud (2007) e Brito Neves (2000)

Segundo Arthaud (2007), essas coberturas metassedimentares são formadas principalmente por xistos e gnaisses pelíticos a algumas ocorrências de quartzitos, mármore e rochas calcissilicáticas. Essas rochas foram afetadas por

metamorfismo de fácies anfibolito alto, acompanhado de migmatização. As foliações em geral, são de baixo ângulo, embora verticalizadas nas proximidades das zonas de transcorrência dúctil que recortem o Grupo Ceará (Arthaud, 2007).

A maior parte do Maciço de Baturité está localizada precisamente na Unidade Independência (CPRM, 2012), do Grupo Ceará. Essa unidade teria uma idade neoproterozóica, formada a partir de um episódio magmático associado ao rifteamento do embasamento arqueano (850/750 M.a).

A Unidade Independência é composta por paragnaisseis pelíticos e semi-pelíticos, migmatizados em diferentes graus. Há gradações nesse domínio para áreas com predominância de micaxistos e quartzitos, com corpos lenticulares de metacarbonatos, rochas cálcio-silicáticas, quartzitos micáceos e metabásicas representadas por granada anfibolito (CPRM, 2012) (Ver Mapa Geológico).

4.2.2 Geomorfologia

Do ponto de vista geomorfológico, a Serra de Baturité, de acordo com Souza (2000), está inserida nos Escudos e Maciços Antigos do Ceará, que correspondem aos terrenos cristalinos pré-cambrianos, representados pelos Maciços Residuais, da qual a referida serra faz parte, e a Depressão Sertaneja.

Esse autor propôs a individualização dos elementos morfoestruturais do Ceará em três domínios. Além dos Escudos e Maciços Antigos, já citados, as Chapadas e Planaltos, correspondentes das bacias sedimentares paleo-mesozóicas, como a chapada do Araripe, chapada do Apodi e Planalto da Ibiapaba, e as planícies e terraços fluviais, correspondentes dos depósitos Cenozóicos completam o quadro morfoestrutural do Ceará (Soares, 2008).

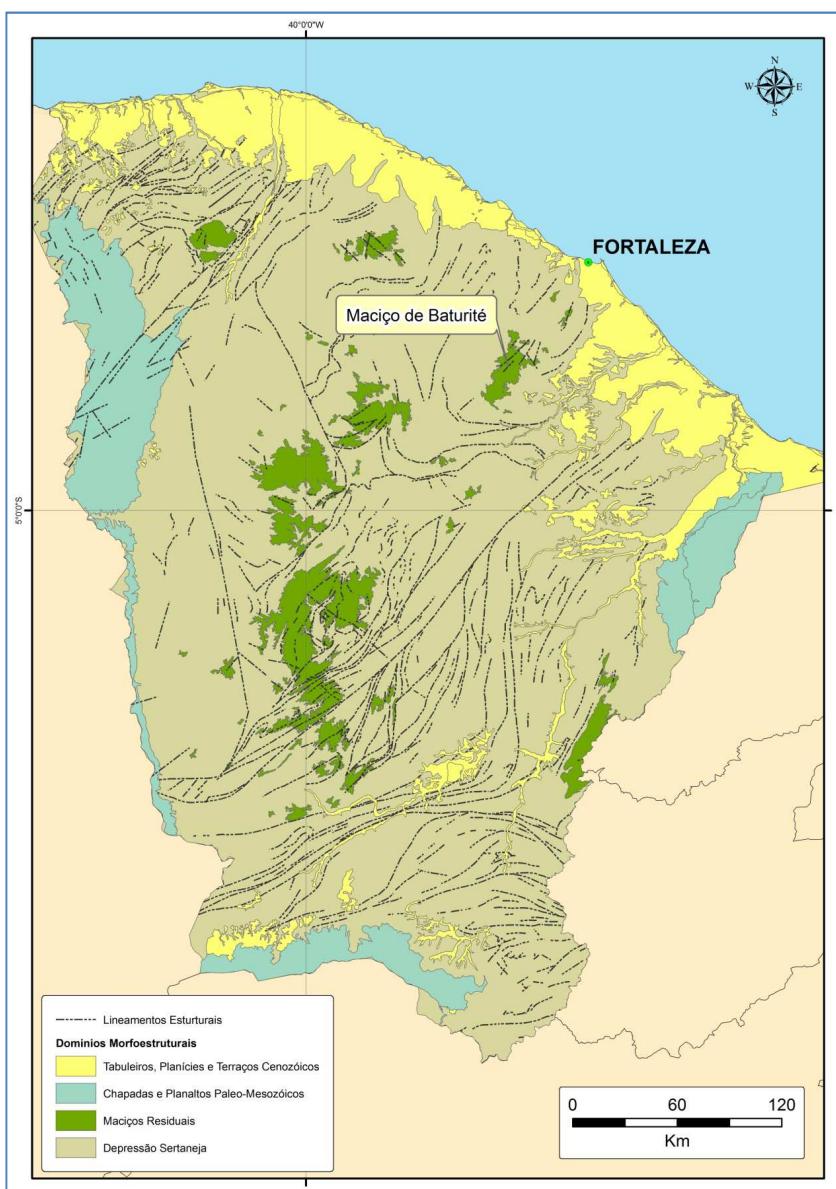
Neste trabalho, os Maciços Residuais e a Depressão Sertaneja foram individualizados em unidades morfoestruturais distintas, uma vez que a evolução dos relevos no escudo cristalino cearense guarda estreita relação com os tipos litológicos e as estruturas tectônicas da região.

Observa-se que no Ceará, os Maciços Residuais ou os ressaltos topográficos acima de 500 m de altitude estão geralmente associados a ocorrências de plútuns graníticos ou à faixas quartzíticas. Além disso, os aspectos estruturais, como falhas e foliações, exercem um nítido controle sobre a evolução e morfologia dos maciços e na diferenciação desses com o seu entorno deprimido.

Foram incluídos ainda os depósitos do Grupo Barreiras no domínio morfoestrutural dos depósitos cenozoicos, e o denominamos Domínio de Tabuleiros, Planícies e Terraços Cenozóicos. (Figura 12)

Segundo Souza (2000), os Maciços Residuais são constituídos por rochas metamórficas ou intrusivas revestidos por florestas perenifólias ou subperenifólias com morfogênese química e evolução associada com os processos de dissecação do relevo. A direção predominante desses maciços é SW-NE ou SSW-NNE e mais raramente S-N.

Figura 12 – Domínios Morfo-estruturais do Estado do Ceará



Fonte: Modificado de Souza (2000).

Tratam-se de montanhas isoladas tendo como superfície de piso (*piemont*), superfícies aplainadas, conservadas entre interflúvios e vertentes bastante inclinadas (Bétard, Peuvast e Sales, 2007).

A Serra de Baturité, juntamente com as serras de Maranguape, Meruoca, Uruburetama, Machado, entre outras, formam as serras úmidas do Ceará, enclaves de umidade e paisagens de exceção no sertão semiárido.

Precipitações orográficas são responsáveis por uma pluviometria elevada formando verdadeiras ilhas de umidade caracterizadas pela presença de floresta perenifólia ou subperenifólia, em meio a um ambiente dominado nos sertões pela presença de caatinga (Bétard, Peuvast e Sales, *op.cit.*).

Nessas áreas mais úmidas, a dissecação do relevo ocorre na forma de topos aguçados ou convexos e os declives das encostas superam os 25%, enquanto que nas vertentes ocidentais a sotavento, apesar de se verificarem processos de dissecação promovidos pela drenagem, a morfogênese guarda semelhanças com certas áreas da depressão sertaneja (Souza, 2000).

O desmatamento nos topos das elevações ou em encostas com declives superiores a 40% dos Maciços Residuais tendem a levar a processos de erosão acelerada e movimentos de massa durante as estações chuvosas (Souza, *op. cit.*).

O Maciço de Baturité representa um relevo montanhoso de altitude moderada (800-900 metros em média) que se sobressai por vertentes abruptas e sinuosas em relação às vastas superfícies aplainadas que caracterizam o sertão, situadas entre 100 e 200 m (Bétard, Peuvast e Sales, *op.cit.*).

Boa parte do Maciço de Baturité foi modelada no mesmo tipo de gnaisses que compõe as baixas superfícies de aplainamento adjacentes, porém a maior parte dos escarpamentos e cristas elevadas são controladas por litologias relacionadas a quartzitos, através dos quais o maciço ficou preservado da ação da erosão regressiva acentuada.

Os contornos do Maciço de Baturité podem ser comparados a um imenso relevo residual resistente, ou um *inselberg*, preservado acima da Depressão Sertaneja, uma superfície rebaixada de aplainamento composta por litologias diversas (Bétard, Peuvast e Sales, *op.cit.*).

4.2.3 Pedologia

Os trabalhos mais recentes de levantamento pedológico na região do Maciço de Baturité apontam para a ocorrência predominante das seguintes classes de solo: Argissolos, Luvissolos, Neossolos Litólicos e Quarzarênicos, além de Neossolos Flúvicos.

O levantamento morfopedológico realizado por Bétard, Peulvast e Sales, (2007) associa as classes de solos com o modelado do relevo e as condições de intemperismo, onde cada unidade geomorfológica corresponde a uma classe predominante de solo.

Os Argissolos Vermelho-Amarelos distróficos ocorrem predominantemente na zona de cimeira com modelado multiconvexo, enquanto os Argissolos Vermelho-Amarelos eutróficos são típicos da zona periférica de dissecação profunda, ocorrendo também nos baixos platôs sedimentares pré-litorâneos, como uma formação detritica de idade mio-pliocênica (Bétard, Peulvast e Sales, *op.cit.*).

Os Argissolos distróficos possuem fraca capacidade de troca catiônica e associação mineralógica caulinita/gibsita. A cor ocre devido à presença de hidróxidos de ferro (goetita) enfatizam características ferralíticas.

Os perfis de intemperismo observados ao nível das meias-laranjas mostraram espessuras da ordem de 20 a 30 metros antes de atingir a rocha sã, de natureza gnássica. Esse intemperismo profundo mostra-se em concordância com uma alteração massiva, implicando em um grau de intemperismo elevado, caracterizado pela decomposição dos minerais primários, com exceção do quartzo.

Essa área é marcada por um desenvolvimento importante de minerais argilosos 1:1 (caulinita) e a presença de um horizonte B iluvial, com baixa CTC (<27 cmol(+).kg⁻¹ de argila) e uma fraca taxa de saturação (<50%), o que os transforma em solos quimicamente pobres (Bétard, Peulvast e Sales, *op.cit.*).

Por outro lado, os Argissolos eutróficos são solos geralmente avermelhados e lixiviados, moderadamente ácidos (5<pH<6), com baixa CTC (<27 cmol(+).kg⁻¹ de argila) mas, com elevada taxa de saturação (>50%).

Suas características químicas e mineralógicas (mistura de minerais 1:1 e 2:1) são intermediárias entre os solos desaturados da zona úmida e os solos saturados da zona semiárida.

Os perfis observados nessa parte do maciço indicam a ocorrência de intemperismo bem mais moderado, quando comparados ao observado na zona de meias-laranjas. O material argiloso da intemperização é formado por uma mistura de caulinita-ilita, sendo a caulinita ainda largamente dominante (Bétard, Peulvast e Sales, 2007).

Os Luvisolos Crônicos ocorrem nos interflúvios da baixa planície cristalina (Sertão), entre numerosos afloramentos rochosos e formas erosivas que se sobressaem dos mantos de intemperismo pouco profundos (<5 m). São caracterizados por uma alta CTC e abundante presença de minerais 2:1, como a ilita e a esmectita (Bétard, Peulvast e Sales, *op.cit.*).

Os Neossolos Litólicos predominam na vertente ocidental do maciço com tendência à semiaridez e possui cobertura pedológica menos espessa e evoluída que o setor a barlavento do maciço.

Na cobertura arenosa de idade pleistocênica dos pouco pedogenizada Tabuleiros, ocorrem os Neossolos Quartzarênicos com forte predominância de minerais 1:1. Esses sedimentos detriticos da Formação Barreiras correspondem à caulinitas bem cristalizadas, herdadas de um paleosolo formado durante períodos mais úmidos do passado geológico (Bétard, Peulvast e Sales, *op.cit.*).

Os Neossolos Flúvicos se desenvolvem nos colúvios-alúvios pouco espessos que recobrem os vales planos alveolares e as baixadas fluviais da zona de cimeira e na Superfície Sertaneja.

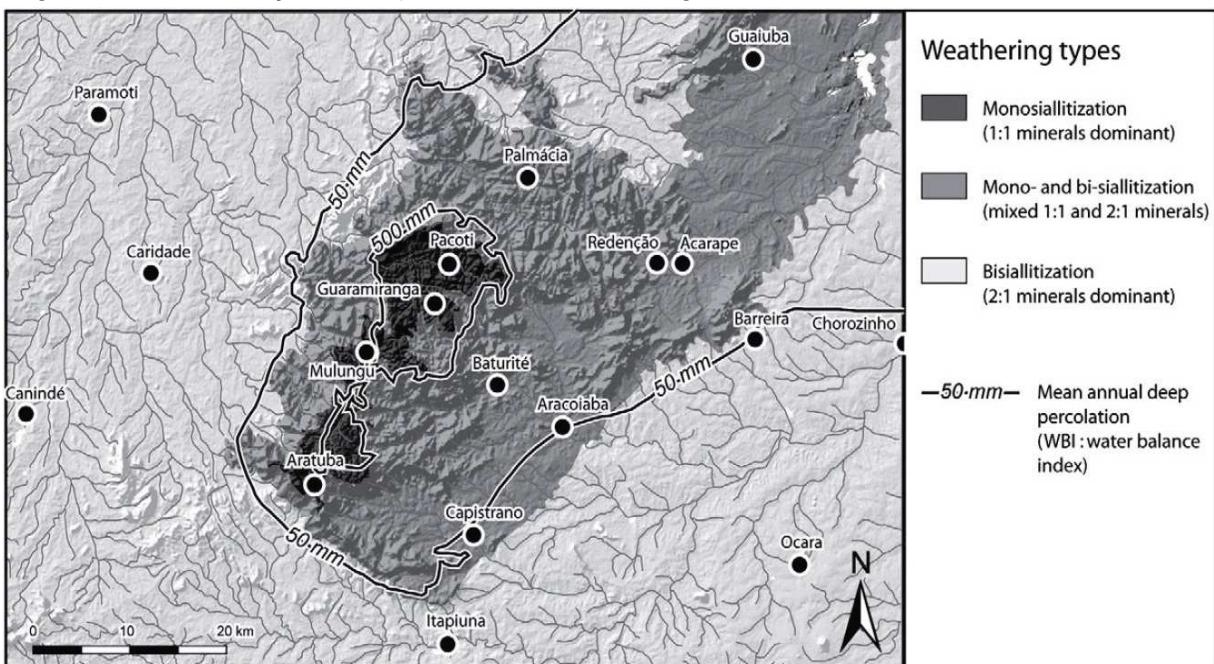
No que diz respeito aos tipos de intemperismo químico, a hidrólise é o principal agente de formação dos solos da região de estudo, havendo uma distinção entre os processos de acordo com os setores topográficos da serra (Figura 13).

Na área equivalente geomorfologicamente à zona de cimeira do maciço, onde o clima é úmido e a pluviosidade é elevada (> 1.300 mm/ano), se constata o domínio da monossialitização, caracterizada pela existência predominante de minerais 1:1 (caulinita) e formação de solos de caráter ferralítico (Argissolos Vermelho-Amarelos distróficos) (Bétard, Peulvast e Sales, *op. cit.*).

Na zona periférica de dissecação profunda ou zona de transição entre a zona de cimeira e o *piemont* do maciço (sertões e tabuleiros), uma área sub-úmida, a monossialitização coexiste com a bissialitização, produzindo uma mistura entre argilominerais 1:1 e 2:1, caulinita e ilita, respectivamente. Predominam os Argissolos Vermelho-Amarelos eutróficos (Bétard, Peulvast e Sales, *op. cit.*).

Por fim, na superfície de piso de clima semiárido, é larga a predominância de minerais 2:1 (esmectitas e ilitas), formando solos de características fersialíticas, como os Luvissolos (Bétard, 2012.).

Figura 13 – Distribuição dos tipos de hidrólise na região de estudo.



Fonte: Bétard (2012).

4.2.4 Clima

No Maciço de Baturité, segundo a FUNCEME (1997), a circulação atmosférica é regida por vários sistemas sinóticos geradores de precipitação: a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), que oscila entre os trópicos, um Centro de Vorticidade Ciclônica, que ocorre de forma variada no período de chuvas, além de outros sistemas de escala regional, como as linhas de instabilidade formadas na costa, as brisas marítimas e as frentes frias (Batista, 2010).

Desses sistemas, o principal responsável pela maior parte das chuvas no Maciço de Baturité e no Ceará, como um todo, é a ZCIT. Esse sistema consiste numa banda de nuvens que circunda a faixa equatorial do globo terrestre, formada principalmente pela confluência dos ventos alísios do hemisfério norte com os ventos alísios do hemisfério sul (Batista, 2010).

Ela atinge sua posição mais meridional, no equinócio de outono (23 de março), e retorna em maio ao hemisfério norte, atingindo sua posição mais setentrional no equinócio de primavera (23 de setembro).

De acordo com a classificação climática de Koppen, o sertão semiárido apresenta clima seco do tipo estépico de baixa latitude (Bsh), com temperaturas médias anuais superiores a 18°C (Sá Júnior, 2009).

Do ponto de vista das condições climáticas locais, o Maciço do Baturité apresenta-se como um enclave úmido no contexto regional do sertão semi-árido com temperaturas médias variando entre 24^a e 26^o e pluviosidade superior a 1.200 mm anuais. (IPECE, 2011).

O clima da região, segundo a classificação climática de Koppen, é do tipo tropical sub-úmido Aw, com inverno seco, chuvas máximas no verão e temperatura média do mês mais frio superior a 18^o C.

Segundo Bétard (2012), três zonas bioclimáticas no Maciço de Baturité podem ser distinguidas:

- A zona de cimeira do maciço de Baturité corresponde a uma zona úmida de pluviometria elevada ($P>1300$ mm/ano), com uma curta estação seca (≤ 04 meses) e uma drenagem climática (ou drenagem profunda) sempre positiva ($Dc>500$ mm/ano). É a área de domínio da floresta perenefólia (*mata úmida*);
- Uma zona de transição sub-úmida nas áreas do entorno das superfícies mais elevadas ($900 < P < 1300$ mm/ano), na qual ocorre uma floresta semi-decídua (*mata seca*), contando com uma estação seca de 05 a 06 meses. A drenagem climática é ainda positiva ($50 < Dc < 500$ mm/ano), ainda que irregular de um ano para outro;
- A zona semiárida se estende majoritariamente sobre a superfície de piso e está em equilíbrio com uma floresta seca decídua (*caatinga*). Para precipitações inferiores a 900 mm/ano, a duração da estação seca se estende por mais de 06 meses e a drenagem climática é bastante fraca ($0 < Dc < 50$ mm/ano), tornando-se nula em pelo menos um ano a cada quatro.

Em relação ao balanço hídrico na região, observa-se que no platô e na vertente oriental úmida, as médias térmicas são mais baixas do que nos demais setores e beneficiadas por um período chuvoso de maior duração, que se estende de janeiro a julho (Mota e Oliveira, 2011).

Por conta disso, maiores teores de umidade são asseguradas durante parte significativa do ano e o excedente hídrico é sempre superior a 600 mm, com máximas correspondentes aos extremos de precipitações. No entanto, na vertente ocidental o balanço hídrico varia de 230 mm em Mulungu a pouco mais de 130 mm em Pacoti (Mota e Oliveira, *op. cit.*).

5 ATRIBUTOS DO MAPEAMENTO GEOTÉCNICO

5.1 Litologias (Substrato Rochoso)

O levantamento do substrato rochoso foi feito com base no mapa geológico da folha Baturité SB.24-X-A-I, elaborado pela CPRM (2012). No entanto, durante o mapeamento de campo, alguns refinamentos e/ou detalhamentos de ocorrências litológicas foram adicionados ao mapa de Substrato.

De modo geral, a região de estudo foi afetada por movimentos deformacionais de natureza dúctil que imprimiu nas rochas uma foliação tectono-metamórfica, determinando um bandamento composicional nos gnaisses e pronunciada xistosidade nos litotipos micáceos (Figura 14), além de dobras e outras estruturas típicas de deformação e metamorfismo (Silva, 2007).

As deformações incluem também conjuntos de zonas de cisalhamento transcorrentes com desenvolvimento de milonitos, principalmente quando separam termos orto de paraderivadas (Torres *et al.*, 2006).

Figura 14 – Feições lineares indicando movimento dextral em gnaisse próximo a zona de cisalhamento no leito do rio Pacoti. (Coordenadas UTM24S 516006, 9532358)



Fonte: Autor

As principais ocorrências litológicas da região são relacionadas à Unidade Independência, a intrusões graníticas, e a depósitos coluvio-eluviais e aluviais nas vertentes e nos fundos dos vales, respectivamente (Cavalcante *et. al.*, 2003).

Do ponto de vista litoestratigráfico, essas duas subunidades não apresentam discordância significativa, o que permite identificá-las como uma sequência litoestratigráficas originalmente única, com tratos distintos de sistemas deposicionais. (Torres *et al*, 2006).

A Unidade Independência (ou Subunidade Aracoiaba, na nomenclatura de Torres (2004) corresponde a uma faixa alongada, sinuosa, conformando estruturação sublinhada pelos traços de foliação, em forma de “U” e constituída dominante por uma associação metavulcânica e outra metassedimentar (Torres, *op cit*).

A associação metavulcânica é caracterizada por rochas metavulcânicas e/ou metasubvulcânicas intermediárias a ácidas. Entre os principais tipos litológicos têm-se metatraquidandesitos e metadacitos (Silva, 2007).

A associação metassedimentar é dominada por rochas metapsamo-pelítica e/ou metapelíticas representadas por paragnaisse e xistos com biotita e/ou muscovita e intercalações lenticulares de quartzitos, rochas calcissilicáticas, e mármore, em parte com porções silicosas (Figura 15).

Figura 15 – Xisto com veio de quartzo e fratura sub-vertical próximo à sede da cidade de Baturité. (Coordenadas UTM24S 514567, 9520149)



Fonte: Autor

Os paragnaisse normalmente são finamente bandados e, por vezes, exibem mobilizados quartzo-feldspáticos, bolsões de fusão ou anatexitos, enquanto os quartzitos ocorrem próximos às bordas da subunidade na forma de corpos

lenticulares (Figura 16), sustentando as maiores elevações na área e apresentam composição que varia de quartzitos feldspáticos a quartzitos relativamente puros e/ou calcíticos, estes ocorrendo próximos a lentes de mármore (Torres *et al*, 2006).

Figura 16 – Contato entre paragnaisse com lente anfibolítica e veio mobilizado pegmatítico. (Coordenadas UTM24S 516862, 9533955)



Fonte: Autor

Os mármores ocorrem, em sua maioria, como um alinhamento de corpos lenticulares calcítico-dolomíticos, branco a cinza claro e de degranulação média, por vezes, contendo tremolita, diopsídio e quartzo. As rochas calcissilicáticas ocorrem também sob forma lenticular exibindo estrutura gnáissica. (Torres *et al*, *op cit*).

Uma sinuosa faixa quartzítica ocorre intercalada aos xistos da Unidade Independência ao longo de toda a vertente oeste do maciço, flexionando para leste até setores próximos à vertente oriental da serra. Essa faixa é responsável pela estruturação dos setores mais elevados, como o Pico Alto e de modo geral, dada a resistência diferencial do quartzito frente aos gnaisses e xistos da região, pela sustentação da vertente oeste da serra à erosão remontante (Figura 17).

As intrusões graníticas que ocorrem na vertente leste do Maciço de Baturité têm como rochas encaixantes os paragnaisse da unidade Independência e os migmatitos do Complexo Tamboril-Santa Quitéria (Figura 18). Esses corpos graníticos são resultados de um magmatismo sin a pós-colisional e apresentam textura porfirítica com cristais de K-feldspato e textura variando de gnáissica, augengnaisse até tectonito-L (CPRM, 2012).

Os depósitos coluvionares ocorrem como depósitos de sedimentos detriticos preenchendo vales e depositados nas vertentes ou sopés de encostas mais íngremes. Correspondem a sedimentos de granulometria variada, incluindo seixos e fragmentos de rocha que variam de centimétricas até métricas em matriz areno-argilosa, transportados pela ação da gravidade. São oriundos da remobilização e transporte do regolito pelos processos erosivos nas encostas (Silva, 2007).

Figura 17 – Quartzito apresentando grande densidade de juntas e fraturas na vertente oriental o Maciço de Baurité em talude na CE-288. (Coordenadas UTM24S 504186, 9535123)



Fonte: Autor

Os depósitos aluvionares ocupam as áreas planas, dispondo-se no leito dos principais rios e riachos da região. São constituídos principalmente de sedimentos arenosos e areno-argilosos de granulação variando de fina a grossa resultante do intemperismo e erosão das rochas (Silva, *op cit*).

O caráter textural e mineralógico das litologias da região responde de modo diferenciado ao intemperismo e à erosão, sendo os xistos, devido sua estrutura friável, os mais suscetíveis na região ao intemperismo, ao passo que os quartzitos e granitos, por conta de sua maciça e coerência, os menos suscetíveis.

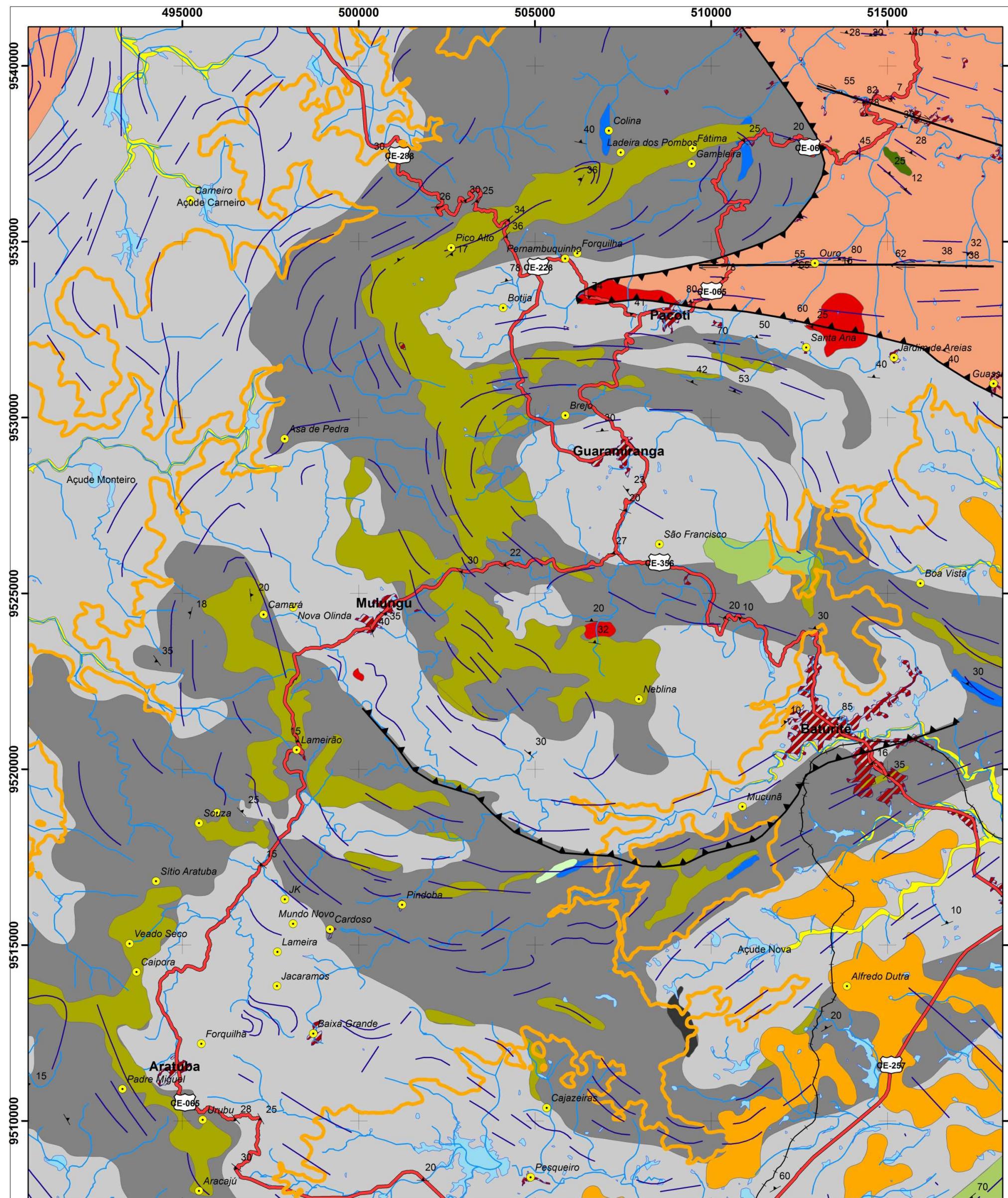
No entanto, as foliações, falhas e fraturas presentes nos quartzitos conferem a esses, grande suscetibilidade a tombamentos e queda de blocos, enquanto os gnaisses, o bandamento composicional pode promover planos de

fraquezas, favorecendo deslizamentos. Por essa razão, o estudo das estruturas lineares na região é fundamental para se avaliar a suscetibilidade e esses eventos.

Figura 18 – Gnaisse com intrusões graníticas e dioríticas na localidade Ouro, em Pacoti.
(Coordenadas UTM24S 513277, 9534311)



Fonte: Autor



SUBSTRATO ROCHOSO



Escala Gráfica
0 2.000 4.000
Metros
UTM24S / WGS 84

Legenda	
Areas Urbanas	Foliações
Localidades	Direção e Mergulho
Foliações	Zonas de Cisalhamento
Contorno Maciço de Baturité	Tipo
Drenagens	Zona de Cisalhamento Compressional
Açudes e Lagos	Zona de Cisalhamento Transcorrente
Sistema Viário	
Classe	
Rodovia	
Ferrovia	

Era	Período	Idade (Ma)	Unidade	Litologias	Símbolo
Cenozoico	Quaternário	2,6	Depósitos Aluviais	Areadas e Argilas	Q2a
	Neógeno	23,5	Grupo Barreiras	Areadas, Argilas e Cascalhos	ENb
	Ediacariano	635	Complexo Tamboril-Santa Quitéria	Granitos	NP3ytsq
Neoproterozóico	Criogeniano	850		Migmatitos	NP3tsm
	Toniano	1000	Independência	Metacarbonatos Quartizitos Cálcio-Silicatos Pegmatitos Anfibolitos Xistos Paragneiss	NP2cica NP2cq NP2cics NP2dp NP2caf NP2dqc NP2cl
Paleoproterozóico	Riaciano	2300	Caridade	Ortognaisse	PP2ycd

5.2 Lineamentos Estruturais

5.2.1 Famílias

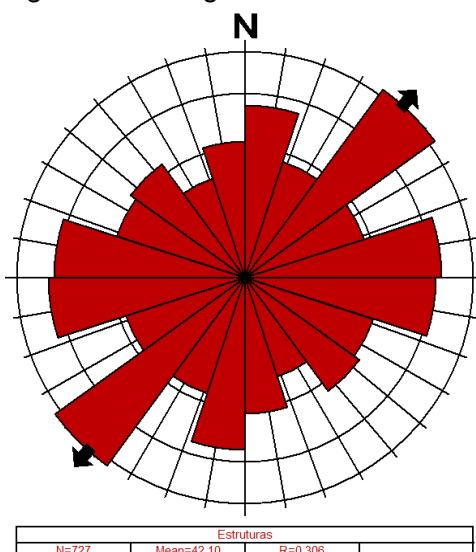
Para a elaboração do mapeamento das feições estruturais na Serra de Baturité foram utilizadas imagens do satélite LANDSAT/ETM, de resolução de 30 metros, cena 217-063 de 22/04/2002, e imagens de radar interferométrico da missão SRTM, refinados pelo projeto TOPODATA, do INPE.

Foram medidas a direção em azimute e o comprimento em metros dos vetores correspondentes aos lineamentos, para posterior geração de um diagrama de rosetas e visualização do *trend* regional destas estruturas e elaboração de mapa de densidade de lineamentos.

A partir da interpretação das imagens filtradas SRTM e Landsat (Prancha 01), foi possível extrair um total de 727 lineamentos na área de estudo, sendo a maioria deles de direção NE-SW, conforme mostra o Quadro 15. Esses lineamentos possuem um comprimento médio de aproximadamente 1.400 m, sendo os maiores, os de direção N-S, embora sejam justamente esses os que apresentam menor população de lineamentos entre as quatro classes de direções adotadas.

A análise das direções dos lineamentos permitiu a geração do diagrama de rosetas abaixo, onde se vê o claro predomínio das estruturas de sentido NE-SW, seguido dos lineamentos no sentido E – W (Figura 20).

Figura 20 – Diagrama de rosetas dos lineamentos da área de estudo



Fonte: Elaborado pelo Autor

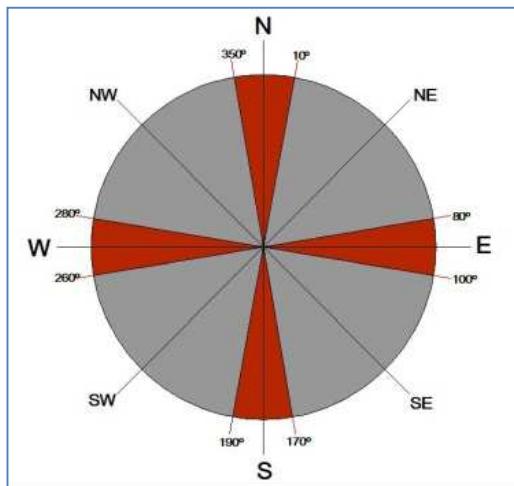
Quadro 15 – Números gerais dos lineamentos obtidos

Classes	População	Comprimento Médio (m)
N-S	54	1.692,35
E-W	188	1.261,07
NE-SW	283	1.339,24
NW-SE	202	1.348,28
Total de Lineações = 727		

Fonte: Elaborado pelo Autor

A determinação das direções dos mesmos foi atribuída segundo um diagrama de rosetas com intervalos definidos arbitrariamente conforme mostra a figura 21, onde foi adotado um intervalo de 20° para as direções N-S e E-W e de 70° para as direções NE-SW e NW-SE.

Figura 21 – Diagrama de rosetas com intervalos utilizados



Fonte: Elaborado pelo Autor

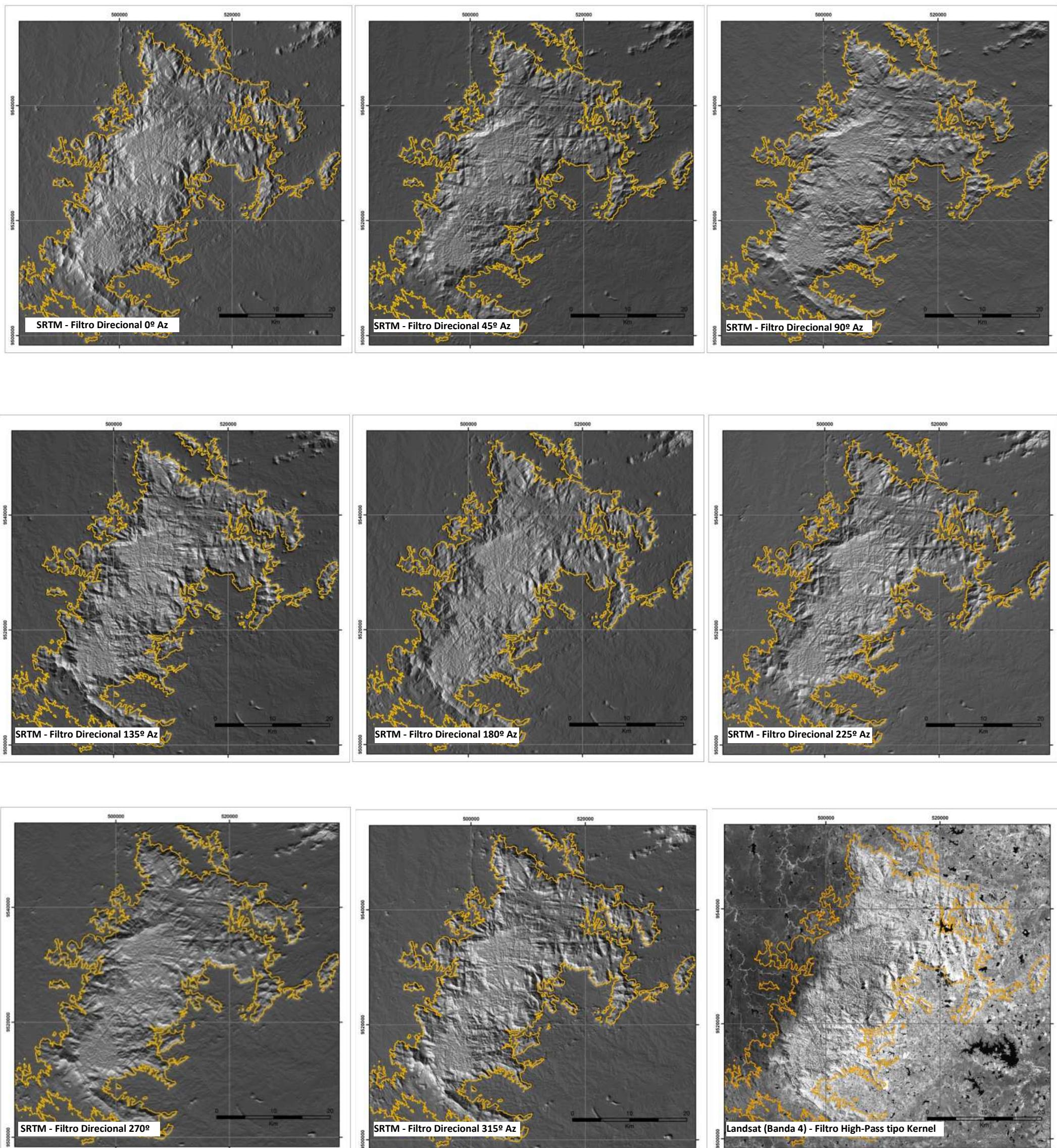
A definição diferenciada de intervalos com ângulos menores para as direções N-S e E-W tem como intuito salientar que as descontinuidades classificadas nessas direções sejam discriminadas mais apuradamente, enfatizando sua ocorrência em relação às descontinuidades NW-SE e NE-SW, que são mais frequentes.

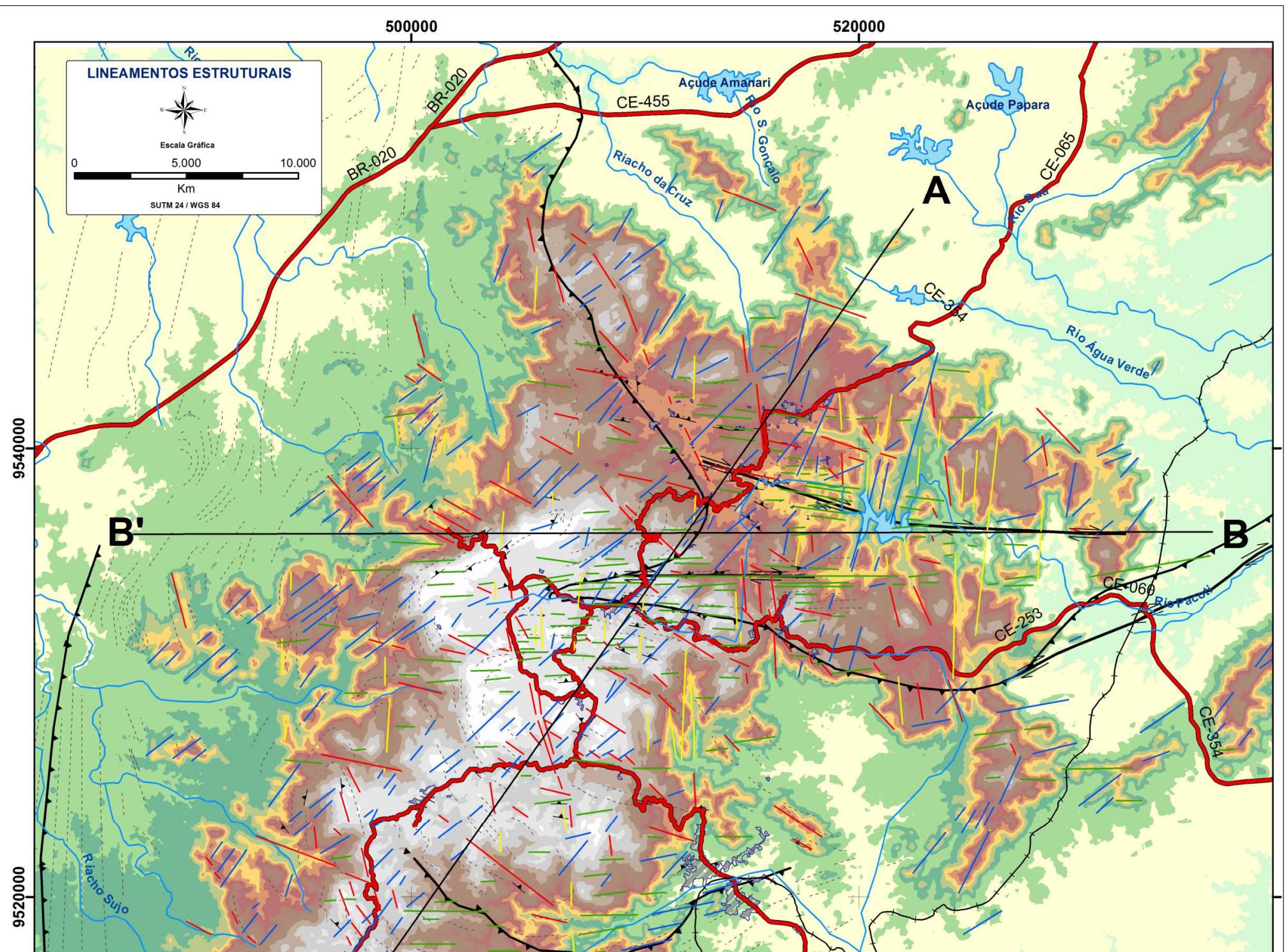
Dessa forma, as famílias de descontinuidades orientadas entre N10W e N10E (Az 350° a 10°) são parte integrante da família N-S, e as orientadas N80E e S80E (Az 80° a 100°) parte da família E-W.

Os intervalos restantes, entre N11E e N79E (Az 11º a 79º) e N11W e S79W (Az 281º a 349º) foram considerados, respectivamente, como parte das famílias NE-SW e NW-SE.

A prancha 01 (Figura 22) mostra os resultados dos filtros direcionais e *high-pass* aplicados nas imagens SRTM e Landsat da área de estudo. Nota-se as diferenças de contornos lineares entre as mesmas que permitiu a vetorização das descontinuidades que foram posteriormente agrupadas nas classes acima mencionadas.

Prancha 01 – Sequência de imagens SRTM e LANDSAT após aplicação de filtragens

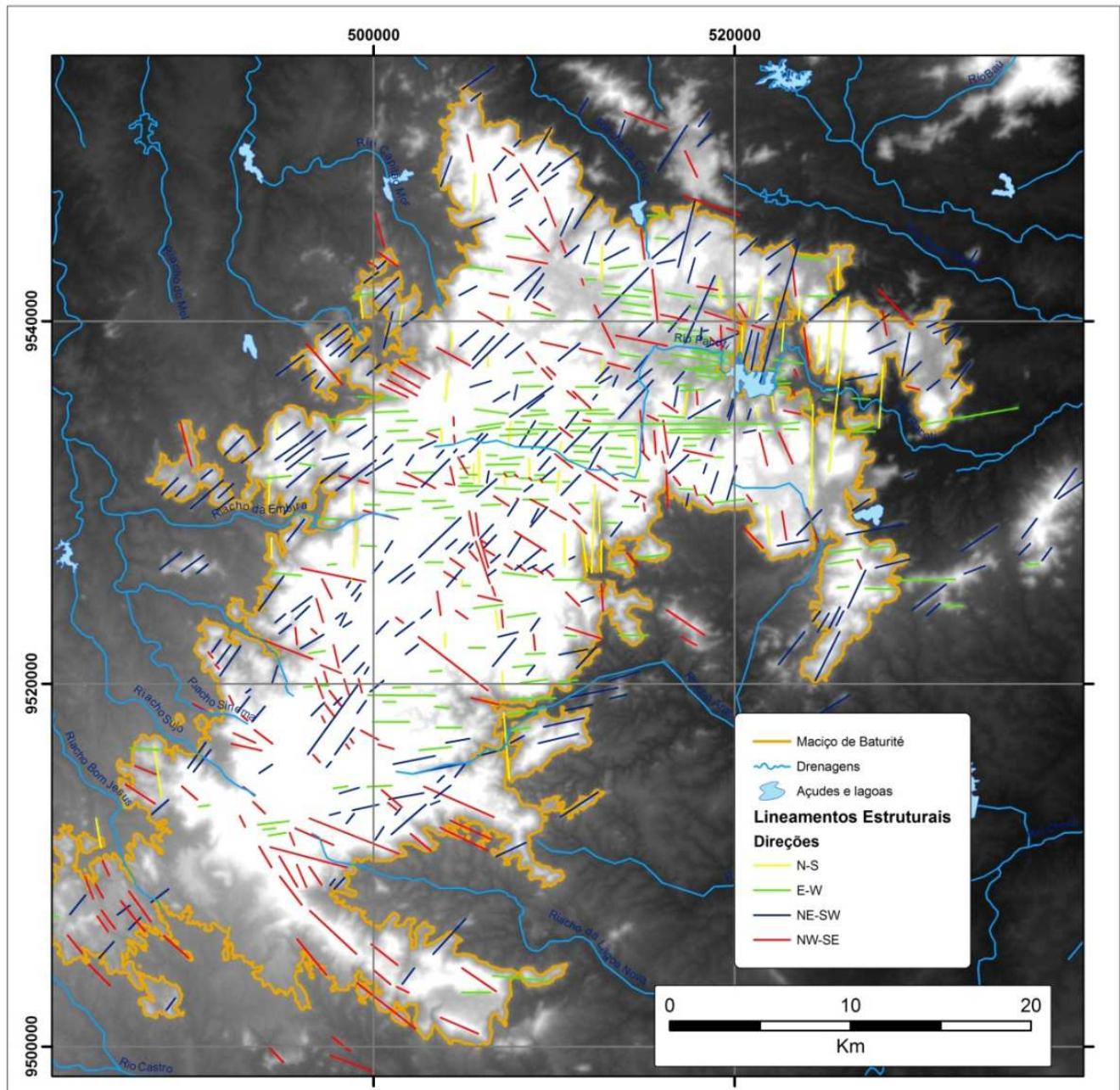




5.2.2 Direções

Após a aplicação dos procedimentos acima mencionados, o primeiro resultado obtido foi o mapa de direção de lineamento (Figura 24), onde se observa os lineamentos distribuídos nas quatro classes anteriormente mencionadas. (N-S, E-W, NE-SW, NW-SE).

Figura 24 – Mapa de direção de lineamentos



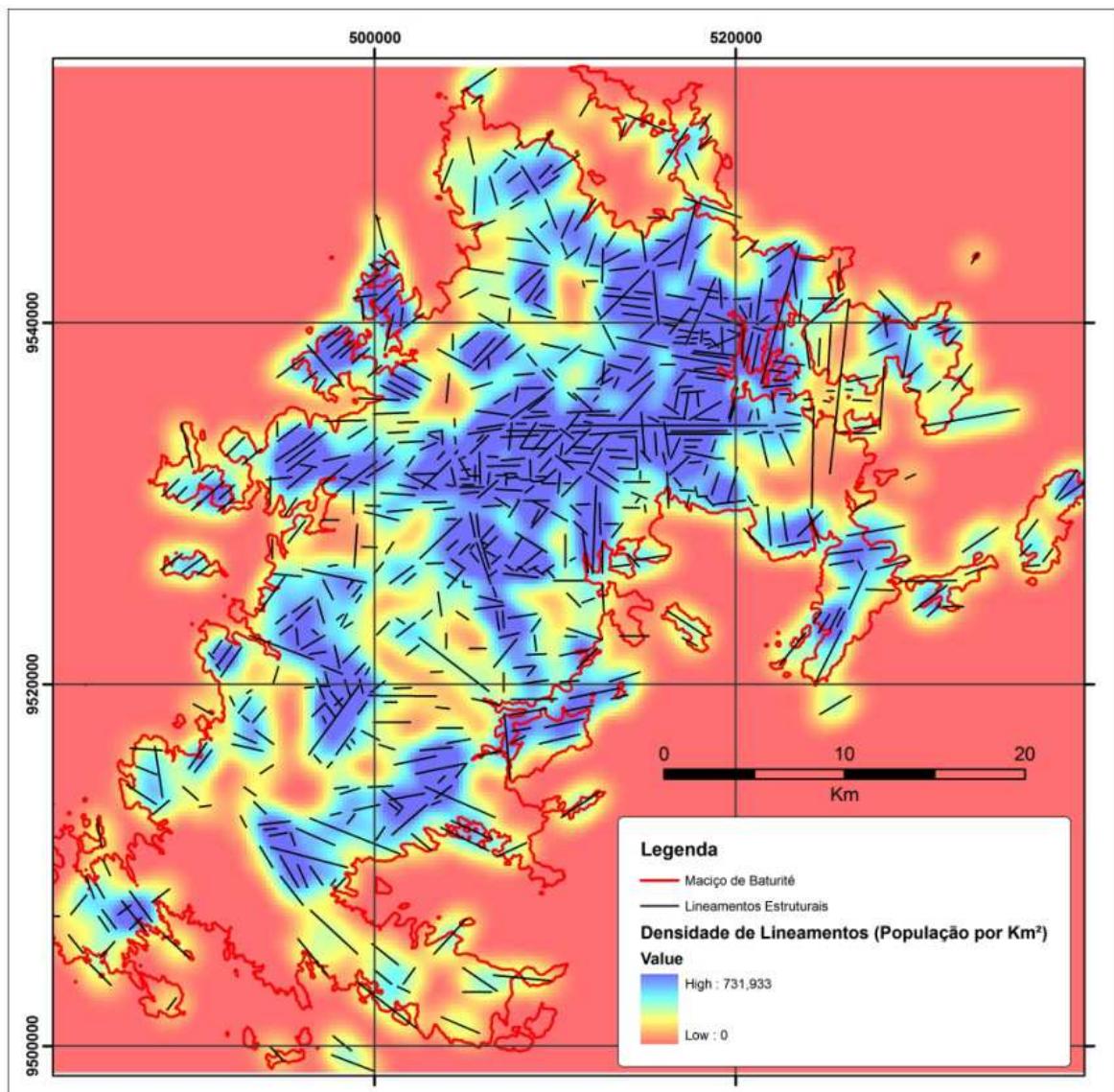
Fonte: Elaborado pelo Autor.

5.2.3 Densidade

Foram elaborados também como subprodutos da análise do mapa de lineamentos estruturais, os mapas de densidade de lineamentos (população/km² e comprimento em km/km²).

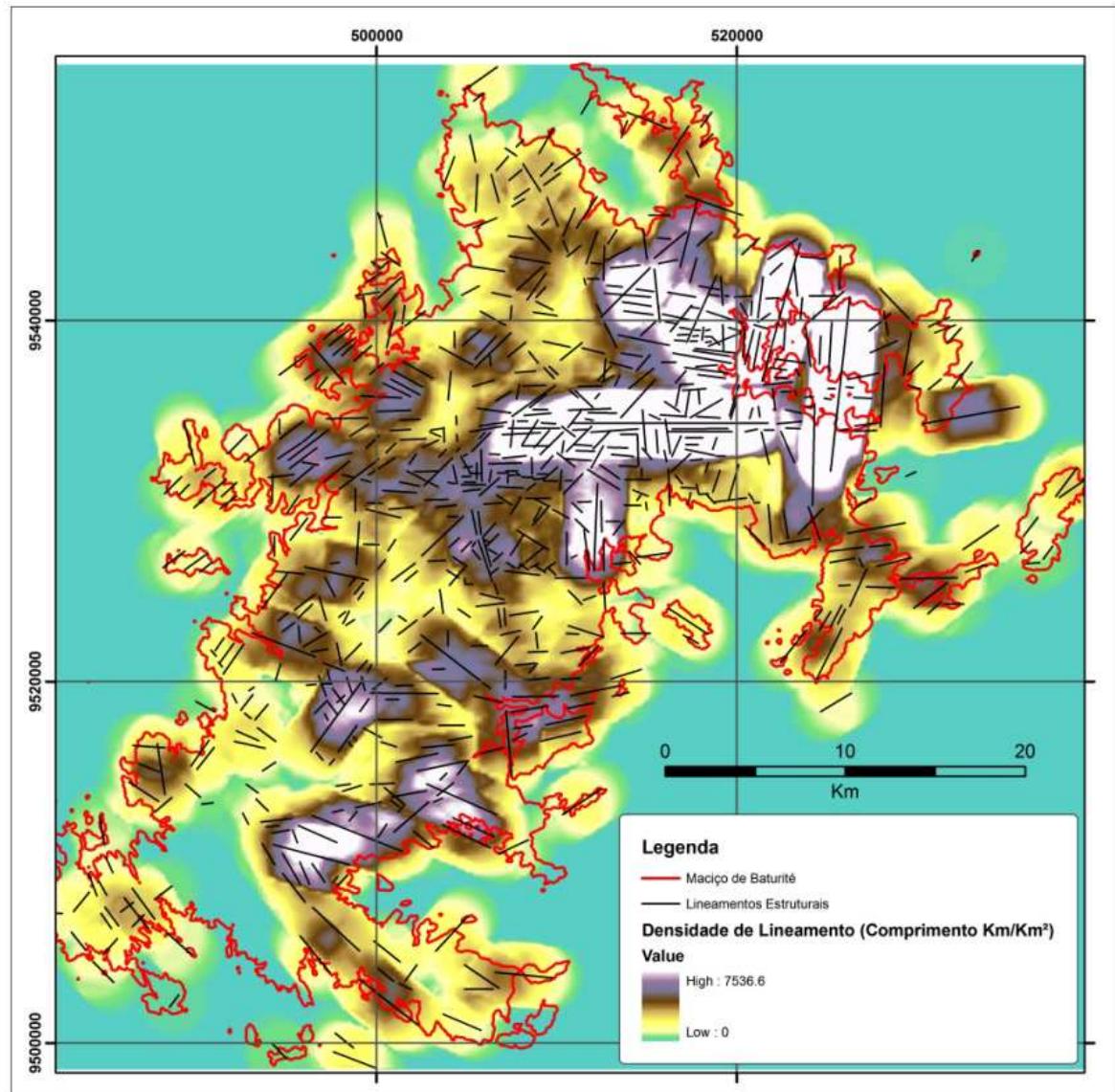
O primeiro mostra o número de lineamentos por determinada unidade de área, e o segundo, é o resultado do cálculo da densidade de cada forma linear por pixel no raster de saída, ou seja, fornece a concentração dos comprimentos dos lineamentos por unidade de área (Figuras 25 e 26, respectivamente).

Figura 25 – Densidade de Lineamentos (População de lineamentos por km²)



Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura 26 – Densidade de Lineamentos (Comprimento dos lineamentos em km por km²)



Fonte: Elaborado pelo Autor

5.2.4 Arcabouço Estrutural Regional

Com a junção da pesquisa cartográfica prévia da região de estudo e com o uso das imagens SRTM e LANDSAT, pôde-se obter um mapa geral das estruturas dúcteis e rúpteis regionais.

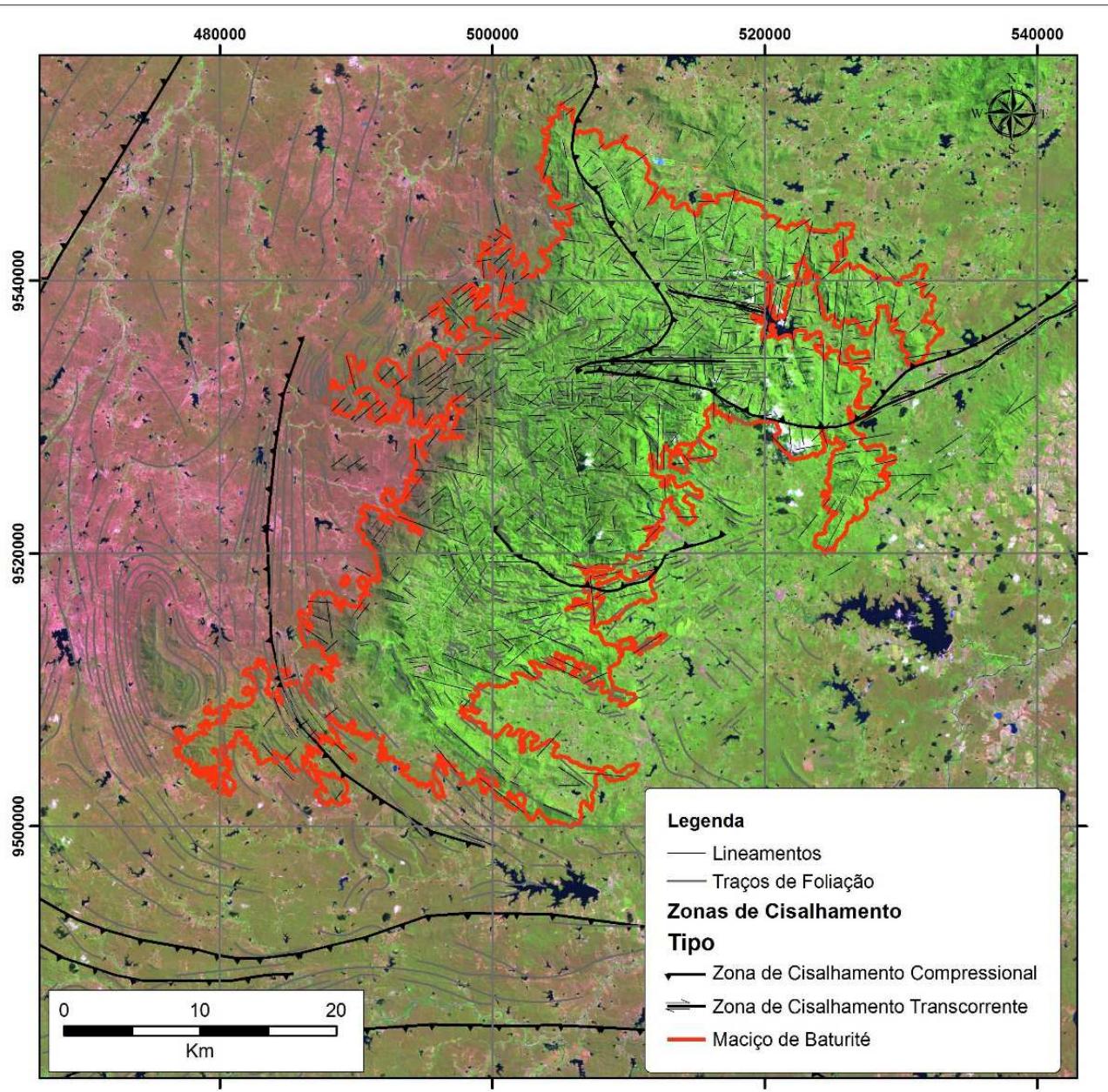
Para tanto, utilizou-se os dados obtidos nos trabalhos de Torres (2004), Paes (2004), Alves (2012), no mapa geológico da Folha Baturité SB.24 X-A-I (CPRM, 2012), além de levantamento de campo.

Sobre os mapas produzidos nos referidos trabalhos, procedeu-se, com a ajuda da interpretação de imagens da banda NIR do LANDSAT e das imagens

SRTM, a vetorização de lineamentos dúcteis, como uma série de zonas de cisalhamento que ocorrem no setor leste da serra e que flexionam em sentido SW. (Figura 27)

Este produto representa o resultado final da sinergia entre o uso de imagens ópticas e de radar na interpretação de lineamentos estruturais.

Figura 27 – Arcabouço Estrutural Regional



Fonte: Elaborado pelo Autor

A interpretação das estruturas ressaltadas nas imagens aqui utilizadas permitiu reconhecer dois domínios estruturais distintos: um setor topograficamente

mais alto da serra de Baturité (Maciço Residual), onde predominam as estruturas rúpteis; de um entorno rebaixado (Depressão Sertaneja), onde as estruturas dúcteis são as feições dominantes.

No setor nordeste da serra destaca-se um conjunto penetrativo de estruturas orientadas N-S, responsável pelo entalhe de alguns vales perpendiculares ao rio Pacoti e pela própria inflexão que este faz em sentido norte, a altura da localidade de Areias.

Dois densos feixes de lineamentos orientados no sentido E-W encontram-se associados a zonas de cisalhamento dúcteis transcorrentes mapeadas pelo Serviço Geológico do Brasil (CPRM, 2012) e por Torres (2004).

A inferior, mais ampla e penetrativa, controla longo trecho do rio Pacoti no setor em que ele atravessa a cidade homônima. A superior, situada cerca de 10 km a norte da primeira e controla trecho do riacho Salgado. Uma segunda inflexão ocorre pra leste, onde o rio Pacoti deságua no Açude Acarape, e é controlada por outras estruturas lineares de sentido E-W com tendência a NW-SE.

No interior do maciço os lineamentos orientados NW-SE e NE-SW correspondem a fraturas, pequenas falhas e outras descontinuidades que se sobrepõem, por vezes a traços da foliação tectono-metamórfica, cujo controle geomorfológico é menos expressivo, entretanto, a influência dos lineamento NE-SW e NW-SE é marcante nas bordas e limites externos com a Depressão Sertaneja.

Quanto ao mergulho das foliações e fraturas, as imagens de satélite não permitem a obtenção de dados em nível de detalhe. É preciso o levantamento de campo para atribuir às feições lineares extraídas com o tratamento das imagens de satélite, informações sobre direção e mergulho de camadas ou fraturas.

Na zona de cimeira da serra de Baturité, observou-se que o mergulho das foliações são mais verticalizadas quando próximas às zonas de cisalhamento (ZC), tornando-se horizontalizadas a sub-horizontalizadas à medida que se distanciam das zonas de cisalhamento.

No leito do rio Pacoti, próximo à sede municipal, a foliação apresenta orientação leste-oeste e mergulhos entre 68 e 80º para norte (Prancha 02 – Foto A). Ao longo dos planos de foliação observa-se uma lineação de estiramento mineral sub-horizontal (N65/18) (Prancha 02 – Foto B), que somada as feições miloníticas e estruturas tipo boudinagem sugerem movimentação direcional em zona de cisalhamento dúctil transcorrente (Prancha 02 - Fotos C, D e F).

Feições similares são observadas mais ao norte, cerca de 10 km acima do rio Pacoti (Prancha 03 - Fotos A,B,C,D e E). Referidas ZC de alto ângulo coincidem com a porção central de duas áreas de maior densidade de lineamentos em população e comprimento (Figuras 25 e 26).

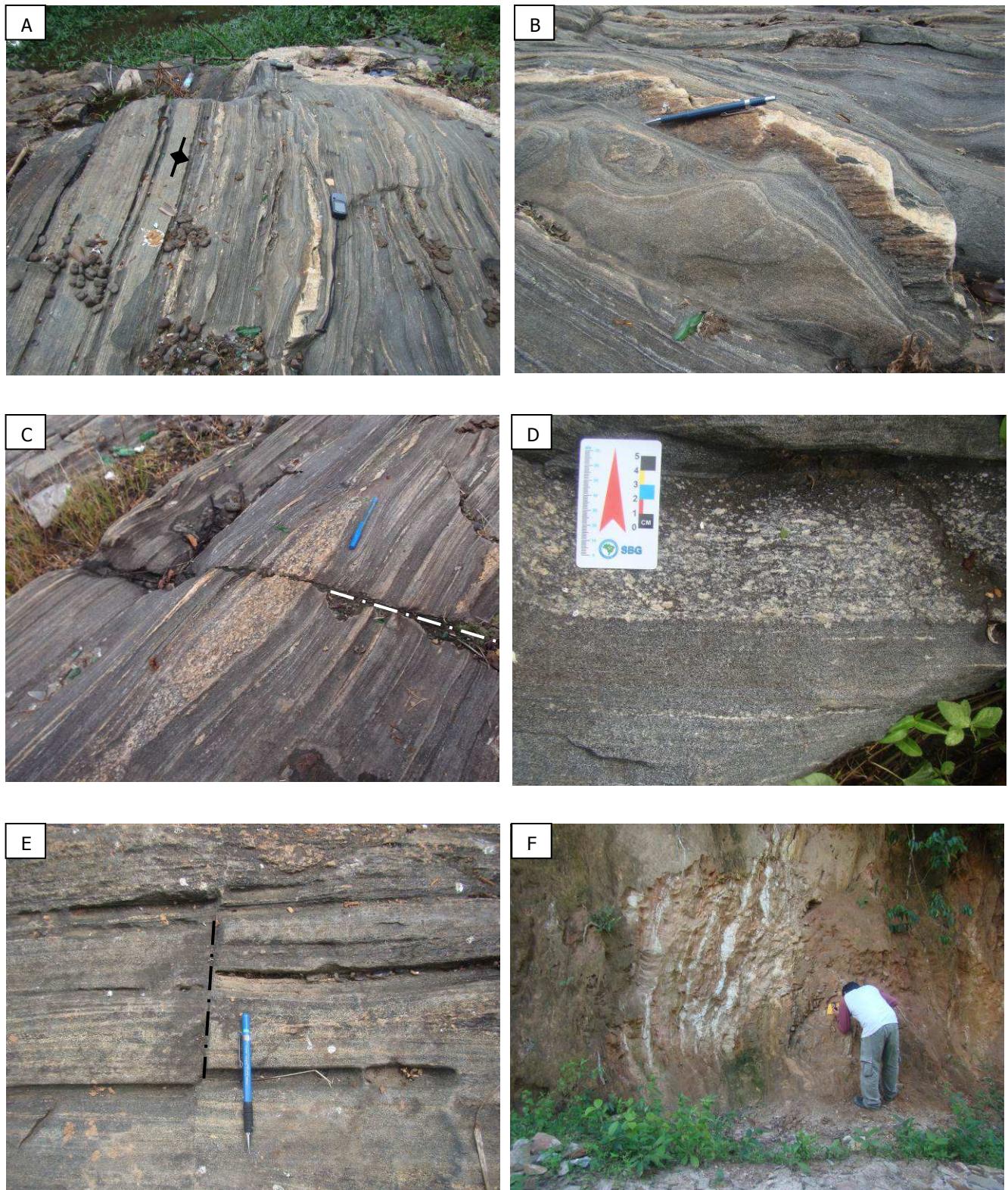
Estruturas rúpteis mais novas representadas por fraturas e pequenas falhas se superpõem aos planos de foliação metamórfica, formando sistemas com orientação subparalela, transversal e, em ângulo, com sua orientação principal (Prancha 02 - Foto E e Prancha 03 - Fotos B, E e F).

Nas vertentes, as foliações assumem ângulos de mergulhos intermediários, muitas vezes em direção aos cortes de estrada, como o caso das estradas CE-065 e CE-228 que ligam a cidade de Pacoti, respectivamente, a Fortaleza e Campos Belos (BR-020). Os condicionantes geológico-geotécnicos de estabilidade de taludes na rodovia CE-065 (Km 46 a 64,3) foram estudados por Alves (2012).

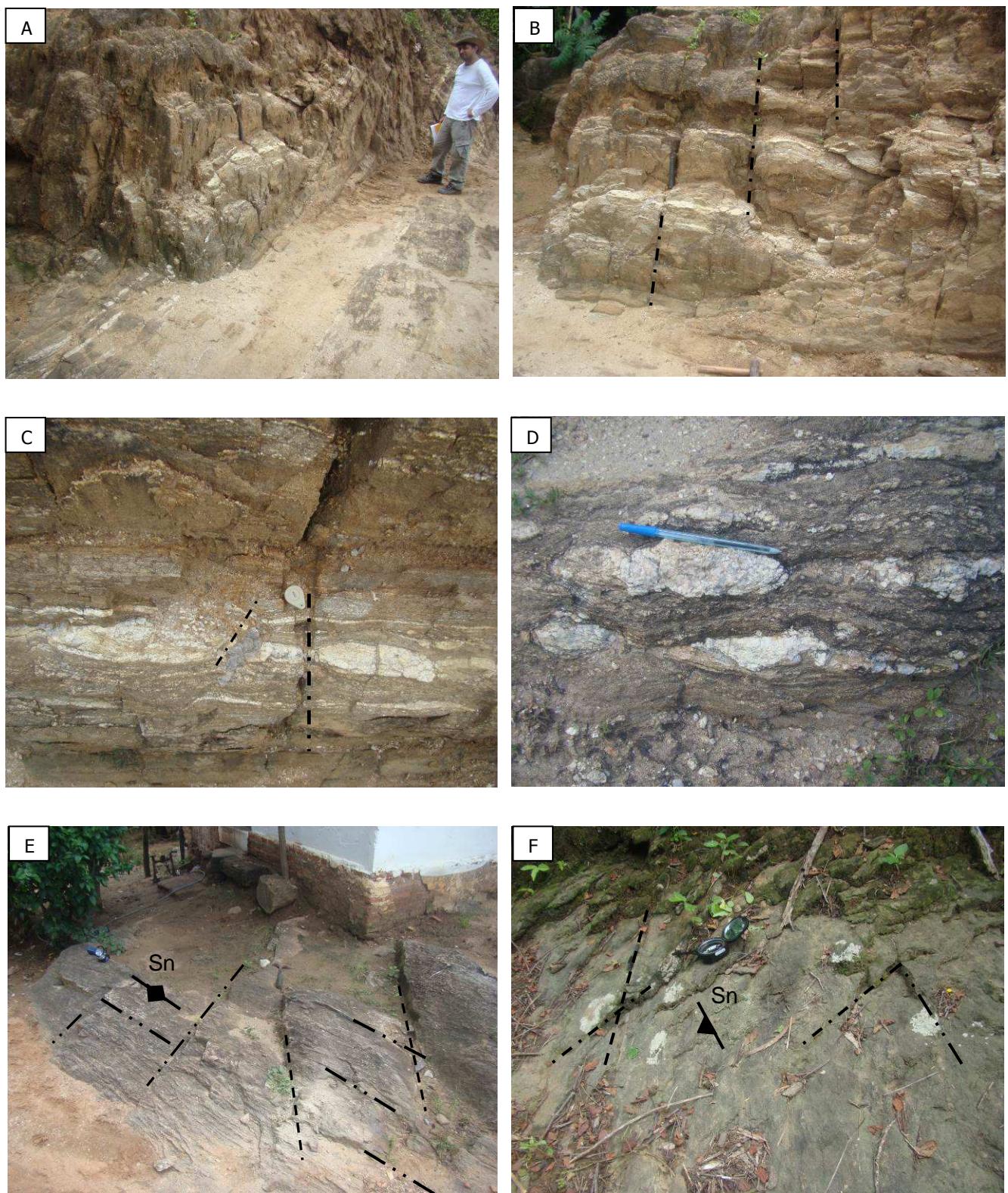
Nessas estradas, as foliações concentram-se no quadrante nordeste, variando de modo geral, entre as direções norte e leste; e possuem mergulhos médios em torno de 35º na direção das vertentes naturais e cortes de estrada, acentuando a propensão de movimentos translacionais e rupturas planares onde fenômenos de queda de blocos e tombamentos ocorrem associados às fraturas (Prancha 04).

Nessa área, a maioria das descontinuidades estruturais pode ser classificada como juntas, e, por conseguinte, não apresenta movimentação alguma, o que limita a disponibilidade de informações sobre a tectônica nesse setor. Essas fraturas apresentam espaçadas e preenchidas por quartzo, feldspato ou material pegmatítico, direção preferencial E-W e mergulho médio de 75º (Alves, *op. cit.*).

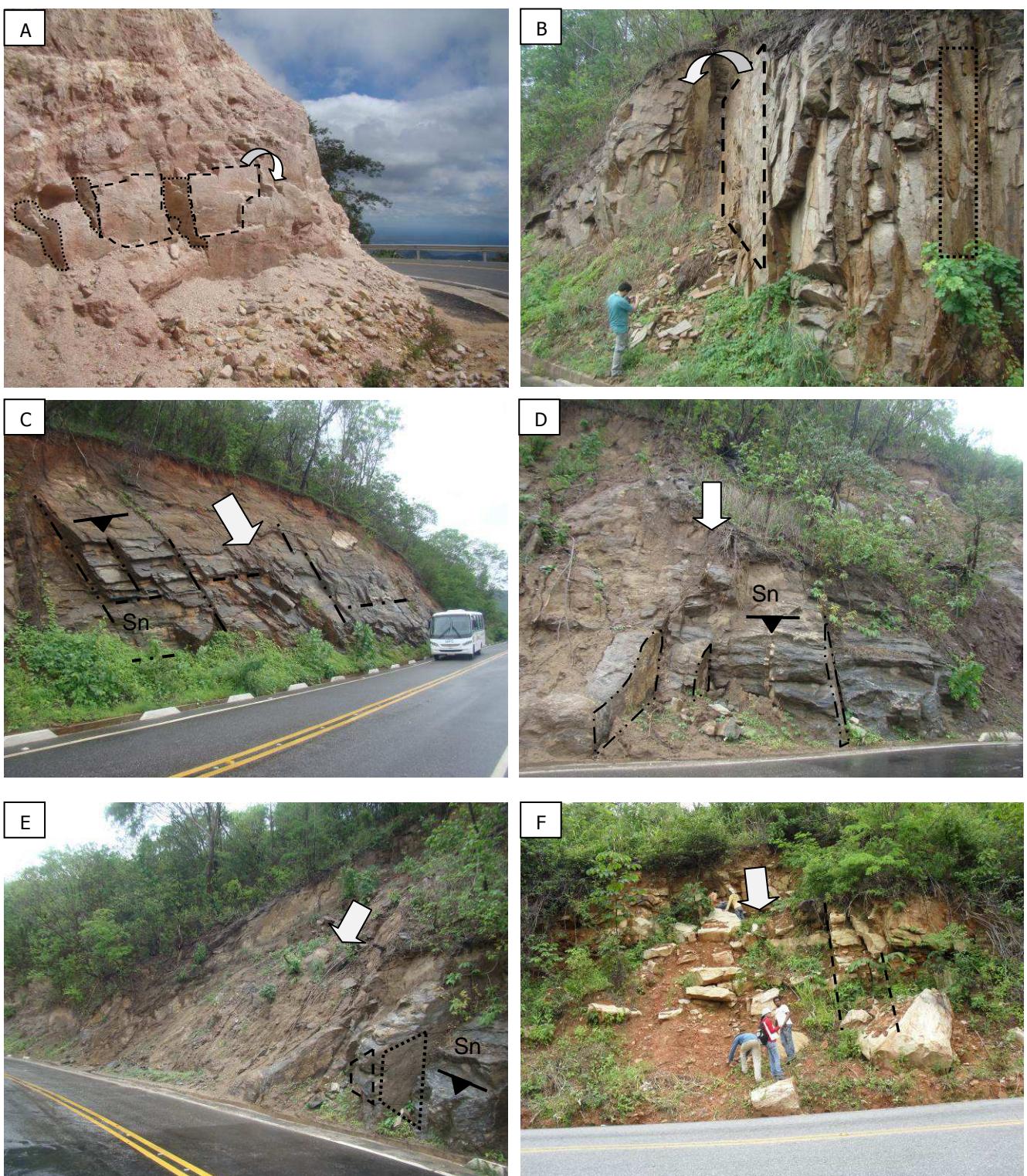
Há também algumas fraturas penetrando a foliação, promovendo o fluxo de água entre as camadas em setores em que já ocorreram deslizamentos. Isso facilita a liberação de blocos e aumenta a instabilidade do talude.



Prancha 02 – A: Bandamento gnáissico subvertical ($N90E\ 68-80/NW$) em zona de cisalhamento dúctil no leito do Rio Pacoti, abaixo da ponte sobre o rio na saída de Pacoti para Palmácia (coord. 509479/9533001-UTM24S /WGS84); B: lineação de estiramento mineral ($N65/18$) sobre plano de foliação subvertical em zona de cisalhamento dúctil de alto ângulo; C: boudinagem em banda quartzo-feldspática seccionada por fratura norte-sul subvertical; D: Detalhe de banda quartzo-feldspática de composição granodiorítica milonitizada, contendo porfiroclástos de feldspato e cristais de quartzo estirados; E: microfalhamentos deslocando bandas quartzo-feldspáticas e biotíticas nos gnaisses situados no leito do rio Pacoti; F: Granada biotita gnaisses em ZC dúctil de alto ângulo a norte do rio Pacoti, em corte de estrada que liga Pacoti a localidade de Ouro. (coord. 511389/9534435-UTM24S/WGS84)



Prancha 03 – A: biotita gnaisses deformados em zona de cisalhamento dúctil vertical, situada a cerca de 10 km a norte do rio Pacoti, próximo a localidade de Volta do Rio (coord. 514368/95338930-UTM24S/WGS84); B: detalhe de sistema de fraturas norte-sul, transversais ao bandamento gnaissico verticalizado; C e D: Bandas quartzo-feldspáticas e neossomas lenticularizados e boudinados em zona de cisalhamento dúctil de alto ângulo; E e F: Sistemas de fraturas rúpteis subparalelas, transversais e, em ângulo, com a foliação milonítica presente nos biotita gnaisses e xistas da Unidade Independência (coord. 514391/9538619-UTM24S/WGS84).



Prancha 04 – A: talude na rodovia CE-228 com risco de queda de blocos e tombamentos associados a fraturas sub-verticais em quartzitos da Unidade Independência (Complexo Ceará) (coord. 504142/9535330 UTM24S/WGS84); B: queda de blocos e tombamentos controlados por fraturas sub-verticais orientadas N50W em granodiorito do Complexo Tamboril-Santa Quitéria na CE-065 (coord. 522861/9544099 UTM24S/WGS84); C: planos de foliação e fraturas transversais, condicionando rupturas planares em talude localizado entre os Km 50 e 51 da CE-065 (coord. 523060/9544756 UTM24S/WGS84); D e E: planos de foliação e fraturas transversais, condicionando rupturas planares em talude localizado na CE-065 (Coord. 523060/9544756 UTM24S/WGS84); F: escorregamento translacional em quartzitos condicionado por planos de foliação e fraturas transversais orientadas na estrada CE-065 entre Baturité e Guaramiranga (coord. 510564/9524425 - UTM24S/WGS84).

5.3 Morfometria

5.3.1 Hipsometria

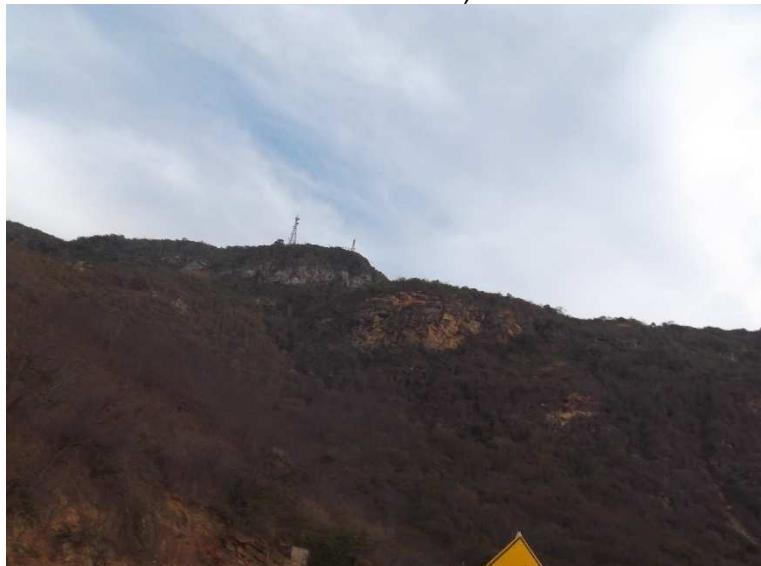
As cotas altimétricas na Serra de Baturité ultrapassam 1.000 m acima do nível do mar, como é o caso do Pico Alto, no município de Guaramiranga, que possui 1.115 m, embora a maior parte da zona de cimeira da serra apresente cotas entre 700 e 900 m.

Nessa zona se situa as cidades de Pacoti, Guaramiranha, Mulungu e Aratuba, enquanto no sopé a barlavento da serra, se encontra a cidade de Baturité, em cotas entre 100 e 200 m. Palmácia, a nordeste da zona de cimeira está situada numa zona mais dissecada em cotas altimétricas que variam entre 400 e 500 m.

Na zona de cimeira há porções rebaixadas de cotas até 800 m relacionadas a xistos de gnaisses, mais suscetíveis ao intemperismo e erosão, enquanto os setores mais elevados, acima de 900 m, estão relacionados a quartzitos que ocorrem principalmente na fachada ocidental da serra e sustentam a erosão remontante nesse setor (Figura 29).

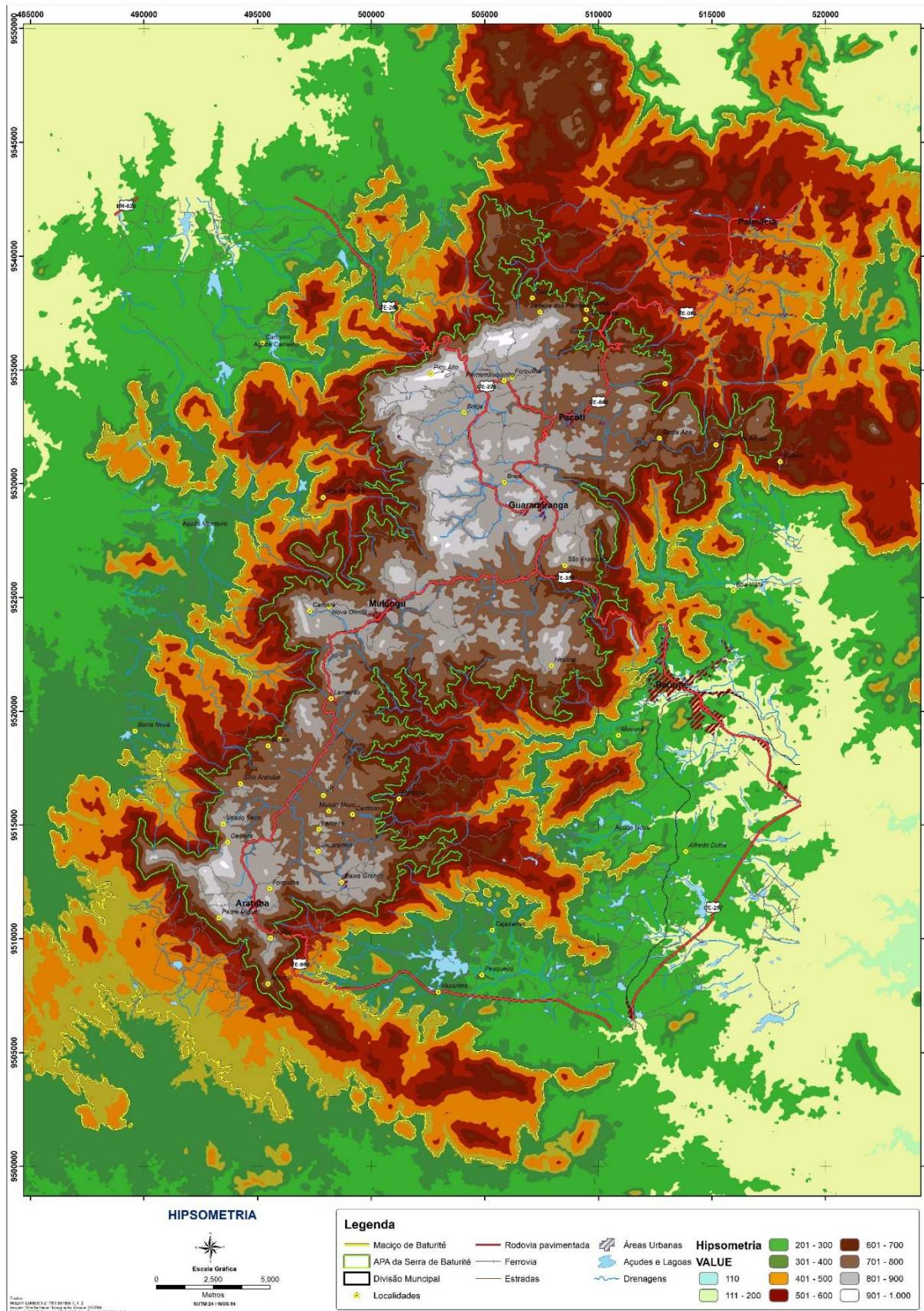
No entorno do grande maciço central de orientação predominante NNE – SSW (concordante com o *trend* regional) ocorrem pequenas e médias elevações isoladas formando ora *inselbergs*, ora pães-de-açúcar (Figura 30).

Figura 29 – Encostas quartzíticas da vertente ocidental da serra de Baturité. (Coordenadas 502279/9536329 UTM24S/WGS84).



Fonte: Autor

Figura 30 – Hipsometria da Serra de Baturité



Fonte: Elaborado pelo Autor

5.3.2 Declividade

A declividade da região de estudo foi obtida a partir do tratamento de imagem SRTM reamostrada pelo projeto TOPODATA, optando-se pelo arquivo _SN, que representa a declividade em forma numérica e permite maior flexibilidade no manuseio dos dados de acordo com a região e o interesse do usuário.

A declividade exerce mais influência sobre os movimentos de massa que sobre a erosão, uma vez que por definição, os primeiros são processos relacionados à ação gravitacional, enquanto que no caso, da erosão, a componente hidráulica é preponderante na deflagração do processo.

O mapa foi elaborado em classes de declividade de intervalos de 0 – 5%, 5,1 – 15%, 15,1 – 30%, 30,1 - 45% e > 45%, onde se observa que as declividades mais baixas estão representadas pelo sopé da serra, as intermediárias, principalmente pela zona de cimeira, e as maiores declividades, pelas encostas, sobretudo os setores nordeste e oeste (Figura 35).

Na zona de cimeira, as baixas declividades correspondem às planícies e terraços aluvionares (Figura 31) e nas encostas, as declividades acima de 45% correspondem às cristas e escarpas e a alguns domos isolados nas vertentes da serra.

Portanto, no que diz respeito à declividade, as zonas mais estáveis da região à movimentos de massa, tende a ser na zona de cimeira e na área que, do ponto de vista geomorfológico, corresponde à Depressão Sertaneja.

De fato, os principais eventos de riscos geológicos registrados na serra através de levantamento de campo e de pesquisa bibliográfica e cartográfica, mostram as áreas de vertentes como aquelas mais predispostas a ocorrerem movimentos de massa.

No entanto, ao longo de estradas e rodovias, os deslizamentos tendem a ocorrer em maior número, mesmo na zona de cimeira da Serra de Baturité, em cotas acima de 700 m.

Os dados que constam na figura de processos naturais na região de Palmácia e Pacoti (Figura 33) foram obtidos através de levantamento de campo e pesquisa bibliográfica, em particular, através do trabalho de Bastos (2012), que mapeou e classificou as ocorrências de movimentos de massa na região.

Figura 31 – Baixas e médias declividades das colinas e planícies aluvionares na zona de cimeira. (Coordenadas 503405/9525674 UTM24S/WGS84).



Fonte; Autor

Na rodovia CE-065, entre as cidades de Palmácia e Pacoti, é onde ocorre a maior concentração de deslizamentos, onde as declividades variam entre 30 e 45%.

Porém, como já discutido anteriormente, a grande concentração desses eventos nessa rodovia é condicionada fortemente também pelas foliações e mergulhos das fraturas, que de modo geral, estão voltados para a estrada.

As altas declividades atuam como potencializadores desses movimentos em uma área já estruturalmente suscetíveis a riscos geológicos.

Outro trecho de forte concentração de deslizamentos é na estrada que liga o Pico Alto ao município de Caridade, onde as declividades em alguns trechos superam os 45%, formando escarpas muito íngremes.

O clima mais seco nesse lado da serra inibe o maior desenvolvimento de solos e favorece a formação de cobertura vegetal de menor densidade, o que acaba por amplificar as ocorrências de deslizamentos e erosão (Figura 32).

É justamente a associação do clima seco com a litologia, de predomínio quartzítico, os responsáveis pela maior parte dos setores com declividade acima de 45% estarem presentes na vertente ocidental da serra de Baturité.

As vertentes do setor nordeste da serra, no lado oriental, apresentam também em alguns trechos declividades acentuadas. Porém, a espessa cobertura

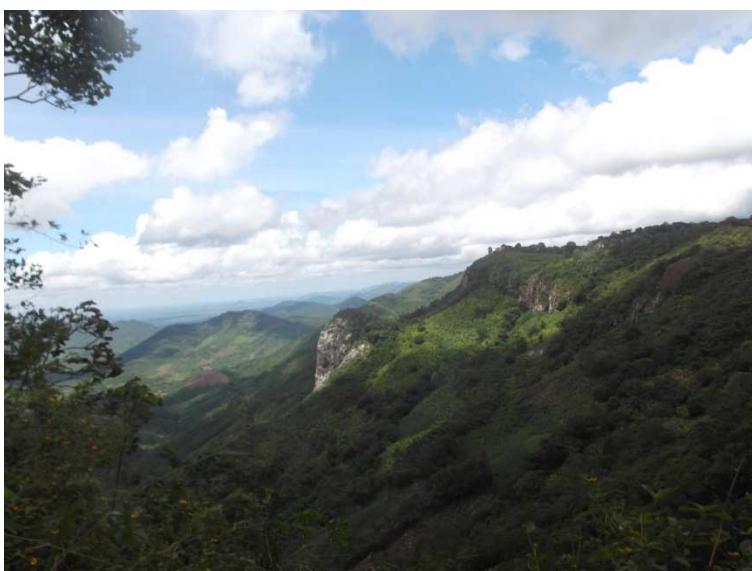
vegetal resultante da maior umidade que essas encostas ficam expostas, atenua o efeito da declividade na deflagração de movimentos de massa (Figura 33).

Figura 32 – Escarpas quartzíticas na vertente ocidental da Serra de Baturité. Condições de semiaridez mesmo a cotas superiores a 800 m. (Coordenadas: 497101/9524567 UTM24S/WGS84).



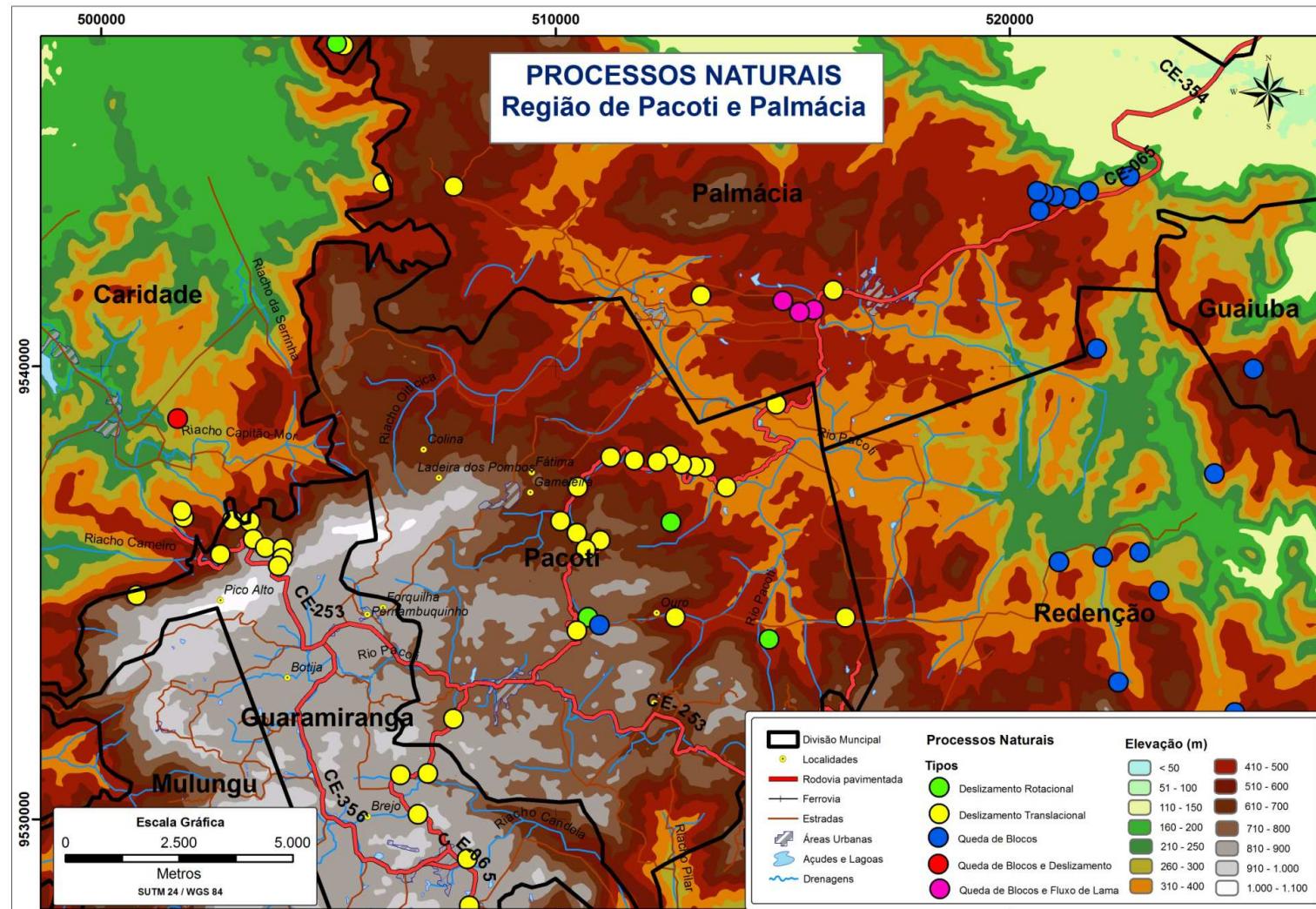
Fonte: Autor

Figura 33 – Setor da vertente oriental com trechos com alta declividade e menor ocorrência de movimentos de massa. (Coordenadas: 516006/9532358 UTM24S/WGS84).



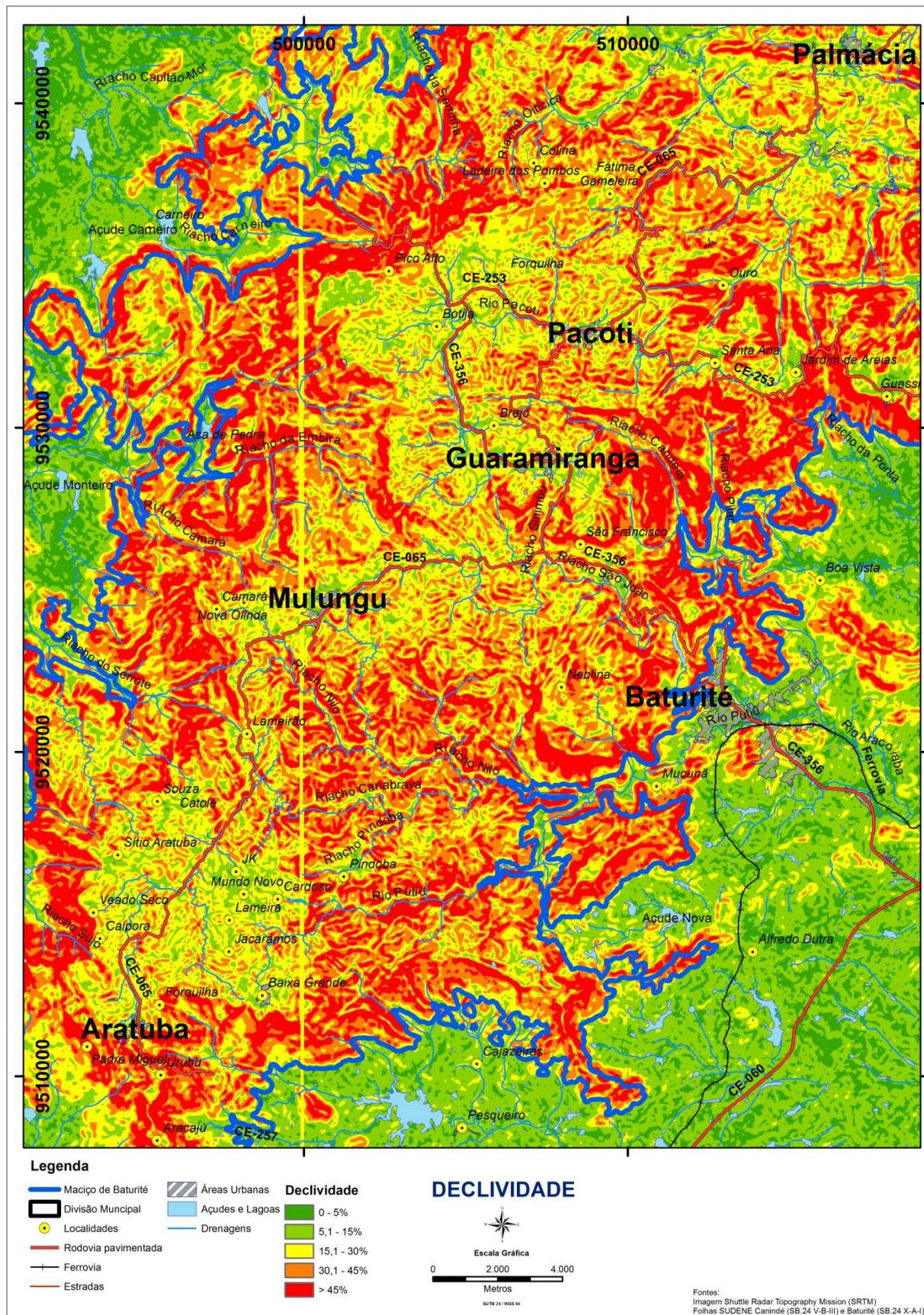
Fonte: Autor

Figura 34 – Processos Naturais na região de Palmácia e Pacoti.



Fonte: Modificado de Bastos (2010)

Figura 35 – Declividade na Serra de Baturité



Fonte: Modificado de INPE (2008).

5.3.3 Formas das Encostas

As curvaturas horizontais e verticais combinadas representam uma caracterização das formas do terreno, às quais se associam propriedades hidrológicas e transporte de sólidos, diretamente, e pedológicas e ecológicas (Florenzano, 2008).

Para a definição das formas das encostas na serra de Baturité, foram utilizados os dados do TOPODATA através dos arquivos __V5 e __H5, que representam respectivamente as curvaturas vertical e horizontal das mesmas.

A curvatura vertical é desse modo, dividida em cinco classes: Muito Côncava, Côncava, Retilínea, Convexa e Muito Convexa; e a curvatura horizontal dividida em Muito Convergente, Convergente, Planar, Divergente e Muito Divergente.

Observa-se na figura 36, que mostra as curvaturas verticais da área de estudo, que as encostas Retilíneas ocorrem praticamente no extremo noroeste e sudeste do mapa. Essas áreas correspondem às áreas de declividade suave da Depressão Sertaneja.

As encostas Muito Convexas ocorrem nos topo das vertentes oriental e ocidental da serra e na sua zona de cimeira, enquanto as encostas Muito Côncavas correspondem, de modo geral, aos fundos dos vales nessas áreas.

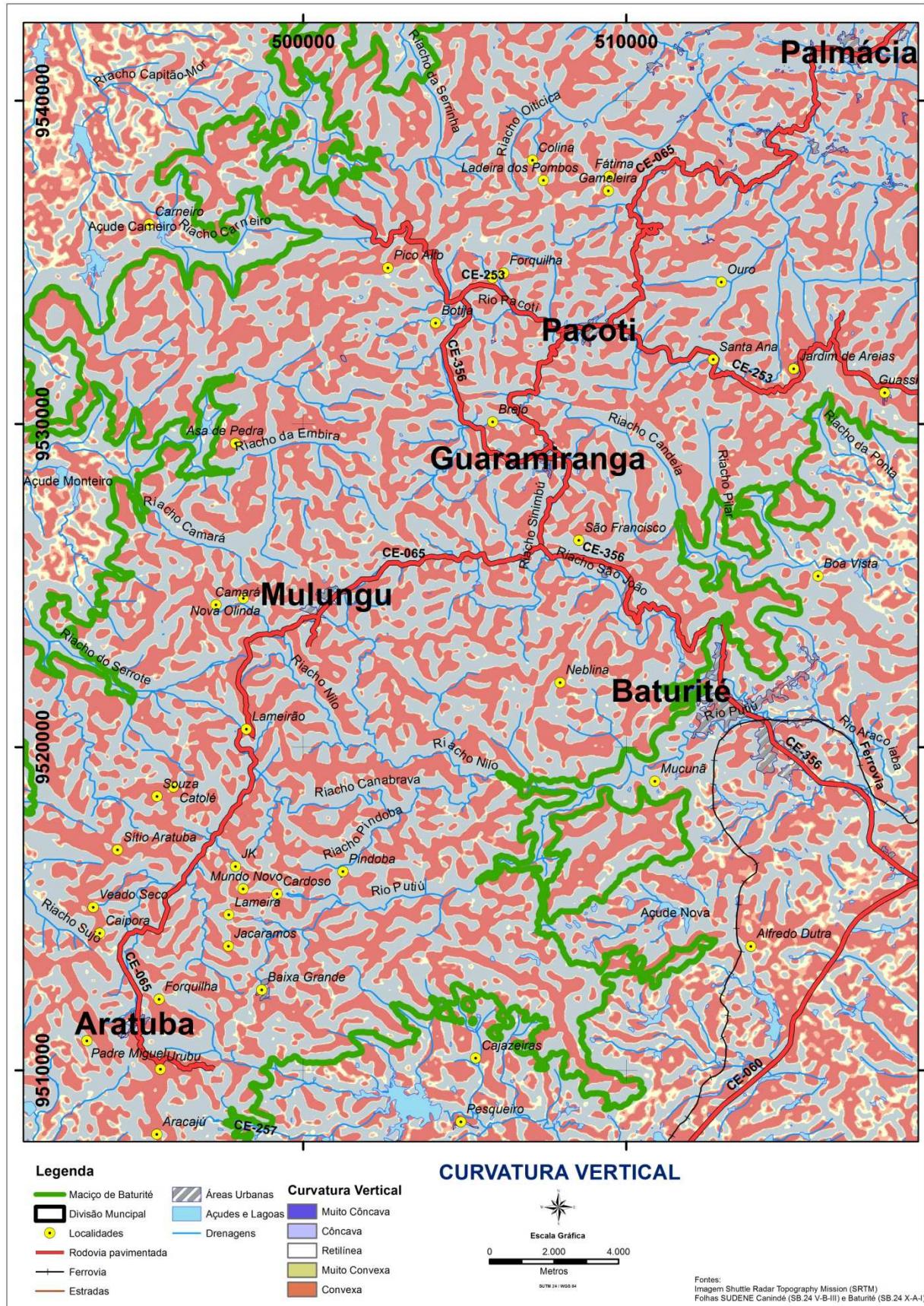
As encostas muito convexas apresentam declividade maior na sua base, enquanto que encostas nas encostas côncavas, as maiores declividades estão na sua porção superior.

O contraste acentuado entre topo muito convexos e fundos de vales muito côncavos, com pouca ocorrência das classes intermediárias, denota um relevo tipicamente formado por topos arredondados e fundos de vales em U.

A figura 37 mostra as curvaturas horizontais da área de estudo, onde se vê uma distribuição mais homogênea das classes de curvatura, embora no setor referente às vertentes oriental e ocidental da Serra de Baturité, haja o predomínio de encostas planares.

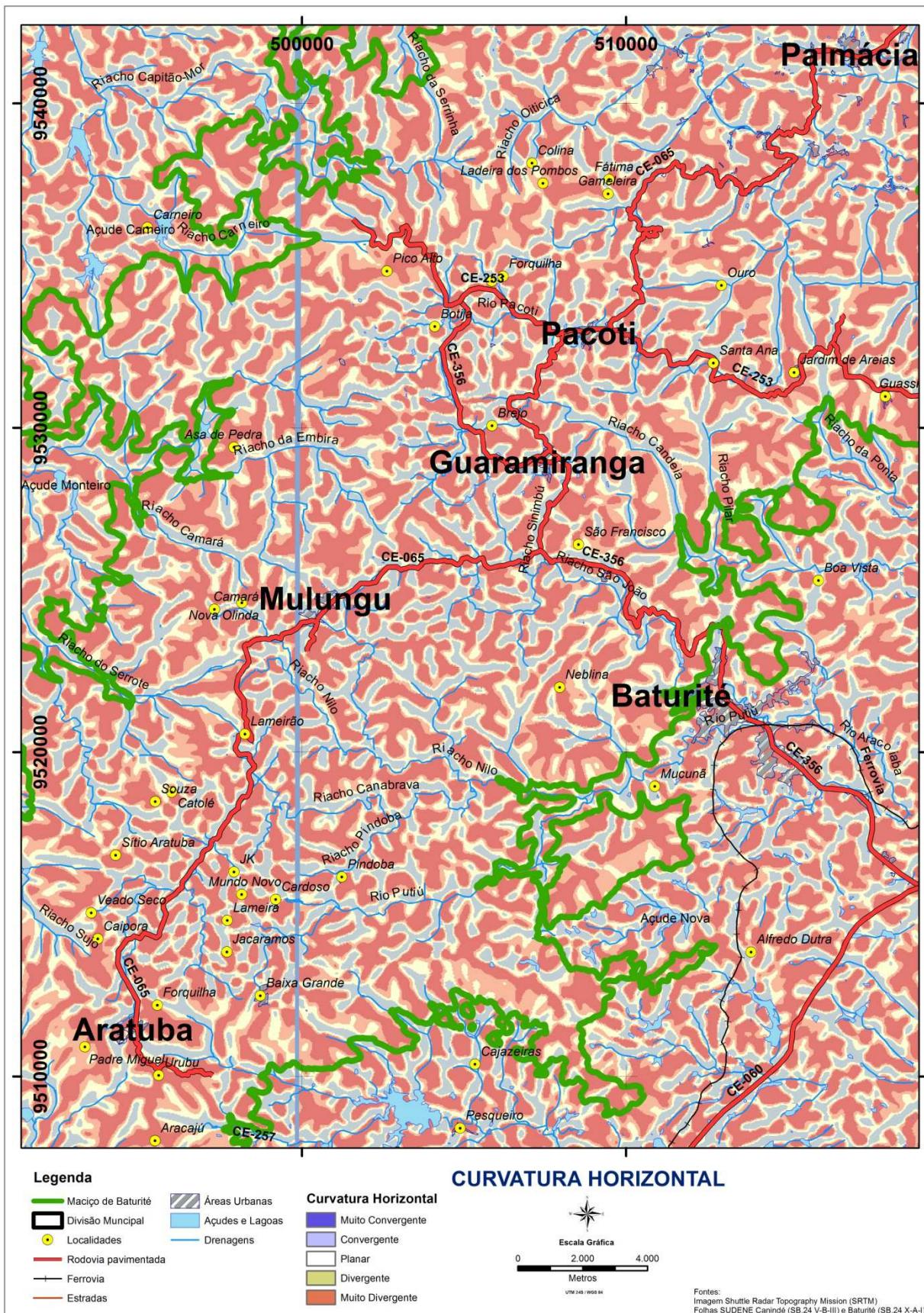
As áreas que combinam curvaturas côncavo-convergente são as mais suscetíveis à máxima concentração e acúmulo de escoamento, enquanto àquelas que combinam as formas convexa-divergente apresentam máxima capacidade de dispersão de escoamento (Florenzano, 2008).

Figura 36 – Curvatura Vertical da Serra de Baturité e entorno.



Fonte: Modificado de INPE (2008).

Figura 37 – Curvatura Horizontal da Serra de Baturité e entorno.



Fonte: Modificado de INPE (2008).

5.3.4 Orientação das Vertentes

A orientação das vertentes é uma medida de ângulo horizontal da direção esperada do escoamento superficial. Quanto maior a latitude, maior a influência da orientação das vertentes no regime hidrotérmico, por causa da incidência de energia solar (Florenzano, 2008).

Podemos dizer que a orientação das vertentes é a direção do vetor cujo módulo é a declividade. Sua principal utilização em geoprocessamento advém de seu poder de descrição da estrutura de hidrologia superficial (Valeriano, 2008).

No caso de mapeamentos geotécnicos, a orientação das vertentes, juntamente com os dados de declividade e estrutura geológica, principalmente foliação e falhas e fraturas, tem função na elaboração de cartas analíticas, como a de adequabilidade para obras viárias, fundações, instalações subterrâneas, entre outras.

A serra de Baturité apresenta, como dito anteriormente, *trend* regional no sentido NE-SW. Essa estrutura favorece o predomínio de vertentes com orientação NW-SE, no entanto, o padrão de falhas e fraturamento na região, com grande número de famílias de estruturas de direção E-W e NW-SE (ver Mapa de Lineamentos Estruturais), promoveu a formação de um grande número de vertentes orientadas também para NE e SW.

As informações sobre a orientação das vertentes juntamente com os dados de mergulho e direção das foliações, bem como a declividade, são os atributos principais utilizados neste trabalho para elaboração do mapa de adequabilidade de obras viárias.

Para a avaliação de adequabilidade para fundações, os mesmos aspectos são utilizados. Em encostas orientadas na mesma direção do mergulho da foliação, a utilização de fundações rasas não é recomendada (Kux et. al., 2007).

Esse é um aspecto especialmente interessante de se avaliar no caso de mapeamento de encostas em áreas urbanas. Na serra de Baturité, o município de Pacoti é o que apresenta maior ocupação de encostas (Figura 38).

A cidade não conta com planejamento territorial apropriado e apresenta uma série de indícios de riscos às moradias da população local por conta da ocupação inadequada das encostas.

Figura 38 – Aspecto das ocupações nas encostas urbanas na Serra de Baturité, no caso, a cidade de Pacoti. (Coordenadas: 508779/9532893 UTM24S/WGS84).



Fonte: Autor

O estudo da orientação das vertentes em áreas urbanas pode dirimir esse problema, como pode atenuar decisivamente os riscos da abertura de estradas nas áreas rurais.

Portanto, os mapas de adequabilidade às obras viárias e às fundações, são o resultado da análise do potencial de risco a movimentos de massa e erosão em setores cortados pelas obras viárias instaladas na região, considerando sua localização em relação à foliação e à orientação das vertentes.

A situação de maior risco é quando a estrada está localizada abaixo de uma vertente com declividade superior a 30 %, orientada na mesma direção para onde a foliação mergulha.

Situações onde a foliação mergulha perpendicularmente ou em sentido contrário à orientação da vertente, apresentam menor risco ao sistema viário. Desse modo, o ideal é que os corte de estradas sejam feitos nas vertentes opostas à direção de mergulho.

Com os dados de orientação das vertentes, declividade e mergulho de foliação é possível elaborar um mapa de adequabilidade de obras viárias, zoneando setores mais suscetíveis a movimentos de massa e erosão e os setores mais seguros quanto a esses aspectos.

Na Serra de Baturité, as rodovias CE-065, que corta a região no sentido N-S, ligando as cidades de Palmácia à Pacoti e à Guaramiranga e Aratuba, e a

rodovia CE- 356, que liga Baturité à Guaramiranga, são as principais estruturas viárias da região.

Há ainda uma rede muito adensada de estradas não-pavimentadas que ligam os diversos distritos e localidades às sedes municipais e à outros distritos. Em diversos pontos dessa estrutura viária há ocorrências de deslizamentos, queda de blocos, erosão, etc.

Alguns pontos são críticos e apresentam muitas ocorrências, como é o caso do trecho da CE-065 entre Palmácia e Pacoti e na CE-253 no trecho que liga o Pico Alto à Caridade.

Outros setores são menos problemáticos quanto às ocorrências de movimentos de massa, a despeito de possuírem elevadas declividades – o caso do trecho da CE- 065 entre Aratuba e Caridade.

A relação foliação e orientação das vertentes explicam essas diferenças de potencialidade e de ocorrências de movimentos de massa.

Como pode ser observada na figura 39, a maioria das foliações no setor norte da serra mergulha no mesmo sentido da orientação das vertentes nesse trecho, enquanto no setor sul da serra, a maioria das foliações está voltada para o sentido perpendicular ou contrário da orientação das vertentes.

Figura 39 – Trecho da CE-228 com corte em quartzito micáceo com mergulho do plano de foliação (S40W) no sentido da estrada. (Coordenadas: 504154/9535335 UTM24S/WGS84).



Fonte: Autor.

No entanto, em seções onde o mergulho da foliação é menor que a declividade das encostas, mesmo essa estando orientada na direção da foliação, os riscos de escorregamentos são minimizados.

É o caso dos setores mais distais das zonas de cisalhamento que ocorrem na região próxima aos leitos do rio Pacoti e de alguns de seus tributários, onde as foliações apresentam mergulho de baixo ângulo a médio ângulo, enquanto próximo às zonas de cisalhamento, as foliações são sub-verticais.

Além da relação da orientação das vertentes com os aspectos geológicos e de declividade, há a interação com a questão pluviométrica, de exposição solar e, por conseguinte, de cobertura vegetal (Oliveira, 1984).

Na serra de Baturité, sabe-se que os ventos agem de Leste para Oeste, portanto, as vertentes do quadrante E, principalmente NE, tendem a apresentar cobertura vegetal mais espessa, ao contrário das vertentes orientadas para SW, W e NW, que apresentam cobertura vegetal mais rarefeita ou menor porte.

Há obviamente, estreita relação entre a cobertura vegetal e os movimentos de massa, e assim pode-se afirmar, que *a priori*, as vertentes orientadas para o quadrante W, são mais predispostas a movimentos de massa, principalmente nos trechos onde há cortes de estrada (Figura 40).

Figura 40 – Cortes de estrada em setor a sotavento da serra com vertentes orientadas a W (Coordenadas: 502307/9536185 UTM24S/WGS84).



Fonte: Autor

As vertentes voltadas para W, NW e SW e que apresentam alta declividade e mergulho da foliação voltada para W são, portanto, as vertentes que apresentam o máximo de risco de movimentos de massa na região.

No entanto, na vertente ocidental da serra, mesmo em trechos de rodovias onde os planos de foliação ocorrem perpendicularmente à estrada, os riscos de deslizamentos, de queda de blocos ou mesmo de tombamentos são iminentes.

Esses riscos são potencializados pela alta densidade de falhas e fraturas, as declividades elevadas, os solos pouco espessos e à esparsa cobertura vegetal característica desse setor da serra de Baturité (Figura 41).

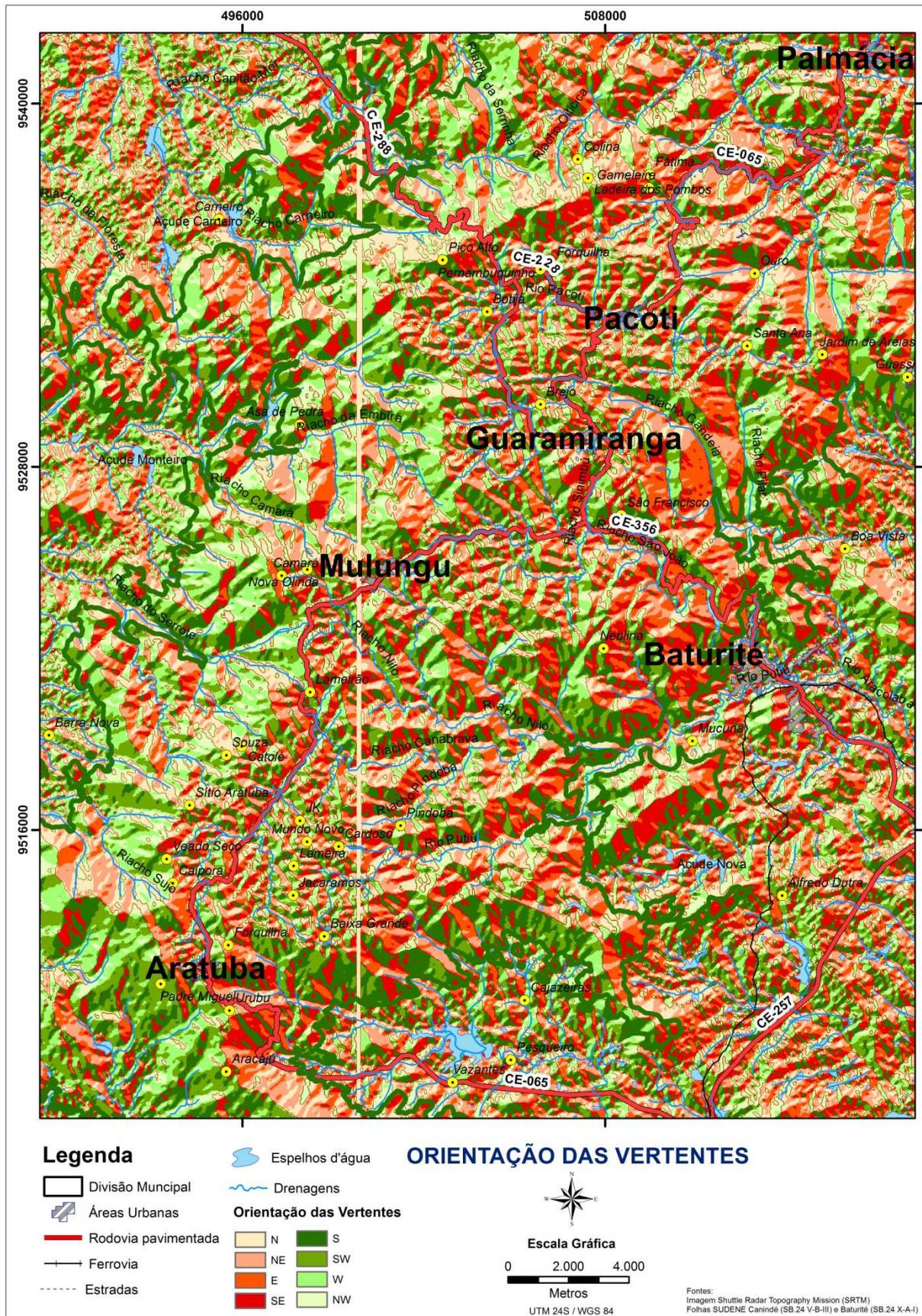
Figura 41 – Sistema de falhas NW-SE sub-verticais em gnaisse mergulho S85W. Trecho da CE-228 em direção à cidade de Caridade. Falha e foliação perpendicular ao leito da estrada. (Coordenadas: 502279/9536329 UTM24S/WGS84).



Fonte: Autor

Esses aspectos podem se observados no mapa de Risco ao Sistema Viário elaborado através da análise dos dados de direção e mergulho dos planos de foliação sobre o plano de informação da orientação das vertentes.

Figura 42 – Orientação das Vertentes da Serra de Baturité



Fonte: Modificado de INPE (2008).

5.3.5 Hierarquização Geomorfológica

Os trabalhos de Bétard, Peulvast e Sales (2007), Bastos (2012) e os subprodutos do TOPODATA (Declividade, Curvatura e Orientação das Vertentes) subsidiaram a elaboração de uma série de mapas morfométricos e morfográficos hierárquicos baseados na metodologia do IPT (1981) e IBGE (2006), que por sua vez, foram utilizados para a elaboração do Mapa de Feições do Terreno.

O Mapa de Feições do Terreno (Figura 43) é o produto final do levantamento morfológico e morfométrico do Maciço de Baturité. Suas unidades serviram de base para elaboração do zoneamento geotécnico geral da região de estudo.

A hierarquia geomorfológica obtida é a seguinte:

1. Domínios Morfoestruturais (IBGE, 2006)
2. Regiões Geomorfológicas (IBGE, 2006)
3. Compartimentos do Relevo (IBGE, 2006)
4. Tipos de Modelado (IBGE, 2006)
5. Unidades de Relevo (IPT, 1981)
6. Feições do Terreno, (1981)

Bétard, Peulvast e Sales (op cit) elaboraram um modelo de compartimentação do relevo para a região do Maciço de Baturité dividido em quatro zonas: zona de cimeira com modelado multiconvexo, zona periférica de dissecação profunda, baixa planície cristalina com *inselbergs* e baixos platôs sedimentares pré-litorâneos. Essas classes geomorfológicas foram enquadradas no mapa 3 da hierarquização proposta.

As zonas foram subdivididas a partir de reformulação de proposta de mapeamento feito por Bastos (2012), onde destacam-se, na zona de cimeira, além das colinas, as planícies alveolares e as cristas. Na zona de dissecação, as sub-unidades foram divididas em vertentes úmidas, vertentes secas e os domos (pães-de-açúcar) e, na baixa planície cristalina, forma discriminadas as sub-unidades *Piemont Semiárido*, *Piemont Subúmido* e *Inselbergs*.

A maior parte dos processos geodinâmicos de erosão acelerada e movimentos de massa ocorre nas vertentes e nos setores topográficos mais elevados, assim será detalhado a seguir essas unidades que segundo terminologia

dos autores acima citados, são as unidades denominadas zona de cimeira e zona periférica de dissecação.

- Zona de cimeira com modelado multiconvexo (meia laranjas)

Topograficamente, essa zona corresponde à parte culminante do Maciço de Baturité, onde foram identificados vestígios de uma superfície de erosão em torno de 800-900 m de altitude, coroada de relevos residuais de quartzito, tal qual o Pico Alto (1115 m), que representa o relevo mais elevado do maciço.

Essa zona apresenta uma paisagem típica de modelado multiconvexo na forma de meias-laranjas com fundo de vales desenvolvidos em manto de intemperismo avermelhado, espesso, formado a partir de gnaisses e micaxistas.

No sopé dos topos culminantes de quartzito, uma rede densa de vales com fundo plano, profundo de em média cinquenta metros, materializa essa alternância notável entre meia laranjas com cobertura florestal densa e fundos de vale planos, cultivados ou desmatados.

O sistema hidrográfico, guiado por uma rede densa de fraturas multidirecionais, permitiu a individualização de numerosos interflúvios convexos de dimensão hectométrica à quilométrica que derivam da superfície de erosão de cimeira, caracterizada por relevos residuais sustentados por quartzito.

Os fundos de vale apresentam um perfil longitudinal com fraca declividade (< 2%), característica que resulta do fato deles se mostrarem ainda preservados da erosão regressiva em função das múltiplas faces de quartzito resistente que caracterizam o traçado a montante. Esses fundos de vale são frequentemente recobertos por formações colúvio-aluvial, argilo-arenosas, pouco espessa.

- Zona periférica de dissecação profunda (com pães-de-açúcar)

Zona de transição geomorfológica entre o Maciço de Baturité e seu *piemont*, esse setor de dissecação periférica é também uma área de transição climática, entre o clima úmido da parte culminante do maciço e o clima semiárido das baixas superfícies adjacentes do sertão.

Ao modelado multiconvexo da parte de cimeira do maciço sucede, com forte contraste, um setor intermediário e periférico de dissecação profunda no qual

vales em V se aprofundam rapidamente e irregularmente por desnivelamentos sucessivos, criando uma paisagem com a presença de elementos rochosos resistentes.

Sob o efeito da dissecação profunda realizada pelos rios que se encaixam de 200 a 300 metros em relação aos interflúvios, as vertentes apresentam forte declividade, frequentemente retilíneas, contendo afloramentos rochosos.

A instalação desses cursos fluviais ao longo de planos de fraqueza e a dissecação profunda operada no manto de alteração descontínuo são acompanhadas pelo afloramento de domos rochosos, do tipo pão de açúcar, esculturados em rochas do embasamento.

Essa zona de dissecação periférica representa a progressão da erosão regressiva em direção ao coração do maciço, até os setores de *knickpoints* ou rupturas de perfis fluviais que delimitam a zona de modelado multiconvexo (Bétard, Peulvast e Sales, 2007).

As classes hierárquicas de maior detalhe, com base especialmente em dados morfométricos, foram elaboradas com base em proposta do IPT (1981) através dos subprodutos do TOPADATA, do INPE.

5.3.6 – Feições do Terreno

Conforme mencionado anteriormente, o mapa das Feições do Terreno foi obtido a partir do cruzamento do mapa de Tipos de Modelados com o mapa de Unidades de Relevo, considerando critérios morfométricos (declividade e topografia) e morfográficos (curvaturas das vertentes).

O mapa de Tipos de Modelado consiste num mapa morfográfico, onde os padrões de formas de relevo apresentam definição geométrica similar em função de sua gênese comum e dos processos morfogenéticos atuantes, resultando na recorrência dos materiais correlativos superficiais (IBGE, 2009).

Os tipos de modelados principais que ocorrem na região são:

- Os modelados de acumulação – planícies e terraços fluviais e aluvionares. Onde predomina a sedimentação e entulhamento dos vales por depósitos arenoso-argilosos.

- Os modelados de degradação – as vertentes da serra de Baturité. Atuam processos erosivos de incisão de vales em áreas de dissecação fluvial marcadas por notório controle estrutural.

- Os modelados de aplanamento – representada pela depressão periférica sertaneja. Forma através de processos de pediplanação, uma superfície de erosão nos setores topograficamente mais rebaixados e de menor declividade.

Ocorrem também na região, algumas estruturas cársticas associadas aos metacalcários do Complexo Independência. Essas estruturas formam modelados de dissolução, no entanto, não possuem expressão cartográfica na escala utilizada deste trabalho.

O mapa de Unidades de Relevo (Figura 43) é resultado de uma classificação baseada na declividade e na amplitude local e foi composto de 07 classes: Colinas de Sopé, Colinas de Cimeira, Morros, Morros Suaves, Montanhas, Morros e Morros de Cimeira, baseado em metodologia desenvolvida pelo IPT (1981), conforme mostra o Quadro 16.

As amplitudes locais têm como referencial, o nível de base local, que na região de estudo, por haver pelo menos dois sistemas hidrográficos distintos, foi representado pelo nível topográfico dos rios Aracoiaba e Pacoti.

O nível de base local do rio Aracoiaba na região é de 110 m, aproximadamente, e a partir dessa cota topográfica, foram classificadas as unidades de relevo. No entanto, como a zona de cimeira da Serra de Baturité apresenta encostas com declividades menores de 15%, não poderiam ser classificadas como Relevo montanhoso, mesmo estando a altitudes acima de 300 m do nível de base local do rio Aracoiada.

De fato, isso significa que o rio Pacoti, e não o Aracoiaba, representa o sistema hidrográfico principal da zona de cimeira, consistindo o seu nível de base local. Dessa forma, utilizou-se para a classificação dessa área, o nível de base local do rio Pacoti na zona de cimeira, que é de 720 m.

É esse nível de base que deve servir de parâmetro para as classificações geomorfológicas que utilizam, necessariamente, as amplitudes locais como critério. Por isso, foi feita a distinção entre as colinas e os morros das duas áreas.

Uma denominada de Colina de Sopé, associada ao nível de base do rio Aracoiaiba, e outra, denominada de Colina de Cimeira, tendo como nível de base, local, o ponto mais baixo do rio Pacoti na zona de cimeira da serra.

Quadro 16 – Critérios para identificação de categorias dos relevos de degradação

Conjunto de Unidades de Relevos	Declividades Predominantes das Encostas	Amplitudes Locais
Relevo colinoso	0 a 15%	< 100
Relevo de morro com encostas suavizadas	0 a 15%	100 a 300 m
Relevo de morros	> 15%	< 100 m
Relevo montanhoso	> 15%	100 a 300 m

Fonte: IPT (1981)

A mesma distinção é feita com os morros de cimeira e os morros das vertentes da serra, que foram classificados segundo a sua curvatura vertical, enquanto as colinas se sopé, segunda a curvatura horizontal, uma vez que para setores de baixa declividade, a erosão laminar é o principal processo morfodinâmico e é controlado mais pela horizontalidade da vertentes que pela verticalidade.

O mapa de Feições do Terreno é dividido em Modelado de Aplanamento, Modelado de Dissecção ou Degradação e Modelado de Agradação, foi classificado da seguinte forma:

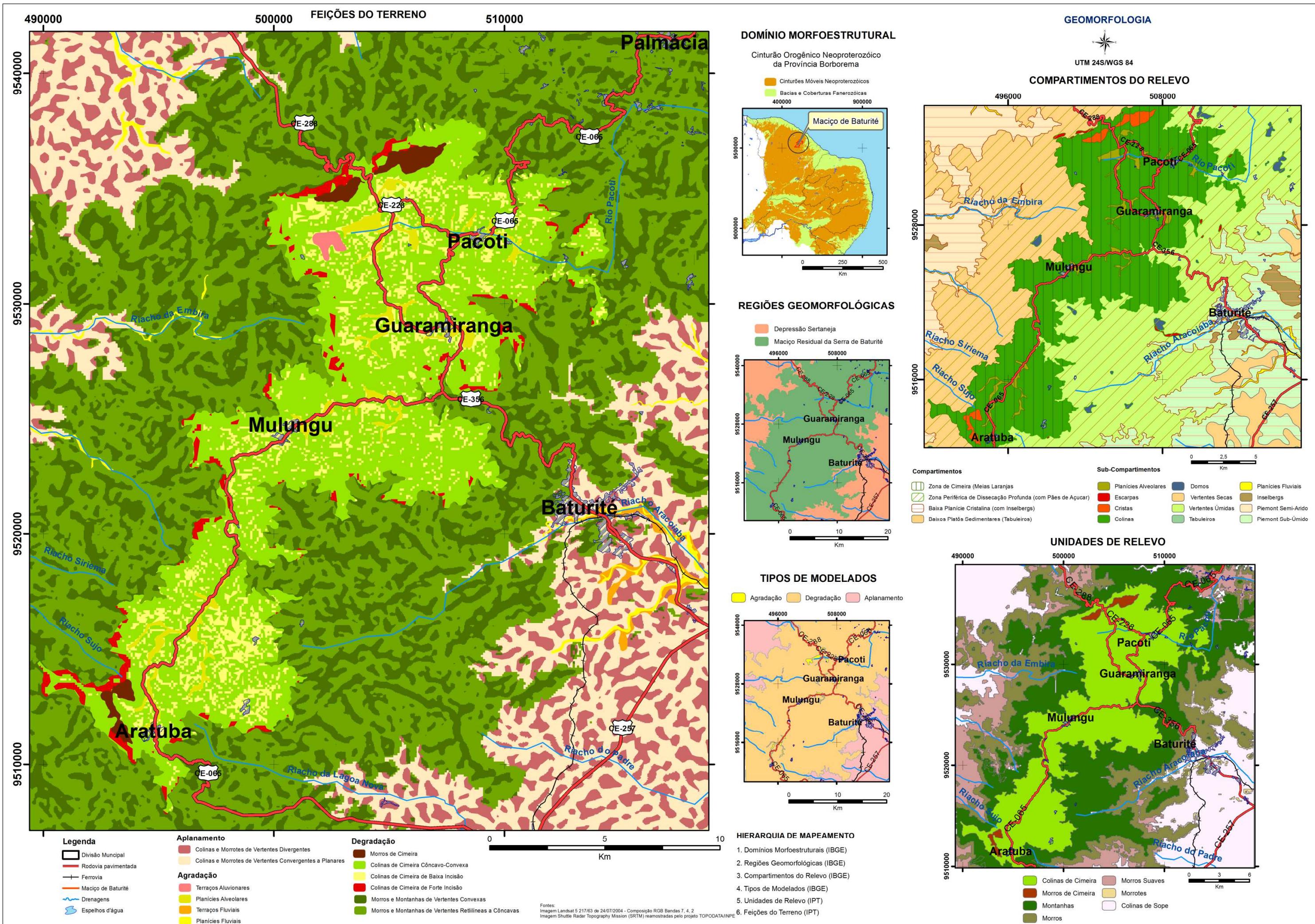
- Relevos de Agradação - divididos em Planície Aluviais, Terraços Aluviais, Planícies Alveolares e Terraços Alveolares
- Relevos de Aplanamento - divididos em Colinas e Morros de Vertentes Divergentes e Colinas e Morros de Vertentes Convergentes a Planares
- Relevos de Degradação - divididos em Morros e Montanhas de Vertentes Retilíneas a Côncavas, Morros e Montanhas de Vertentes Convexas, Colinas de Cimeira de Forte Incisão, Colinas de Cimeira Côncavo-Convexa e Morros de Cimeira.

Pode-se observar no mapa de Feições do Terreno que as áreas de Relevo de Aplanamento apresentam distribuição espacial equilibrada de Colinas e Morros de Vertentes Convergentes e Divergentes. Isso é resultado das baixas declividades com interflúvios tabulares e vales pouco entalhados.

As áreas de agradação ocorrem principalmente nos leitos fluviais da Zona de Cimeira e da baixa Planície Cristalina, onde as declividades mais baixas favorecem a acumulação de sedimentos, e praticamente inexiste na Zona Periférica de Dissecção, que corresponde em termos de Unidades de Relevo, aos Morros e Montanhas.

Nas áreas de Relevo de Degradação, constituída por Morros, Montanhas e Colinas de Cimeira, os critérios de discriminação utilizados foram a declividade e curvatura vertical. A declividade distingue as colinas de alta e baixa incisão na zona de cimeira. Ou seja, aquelas áreas onde a dissecação é mais pronunciada daquelas mais conservadas.

A curvatura vertical distingue os Morros e Montanhas de vertentes convexas daquelas de vertentes côncava ou retilínea, bem como as colinas côncavo-convexa, que representam as colinas de topos arredondados e vales em U, (as Meia Laranjas da Zona de Cimeira, em termos de compartimentos geomorfológico).



5.4 Pluviosidade

O principal processo de formação de chuvas na região da Serra de Baturité é orográfico, uma vez que a mesma forma uma barreira natural ao ar úmido que sopra no sentido E-W resultando em maior pluviosidade a barlavento.

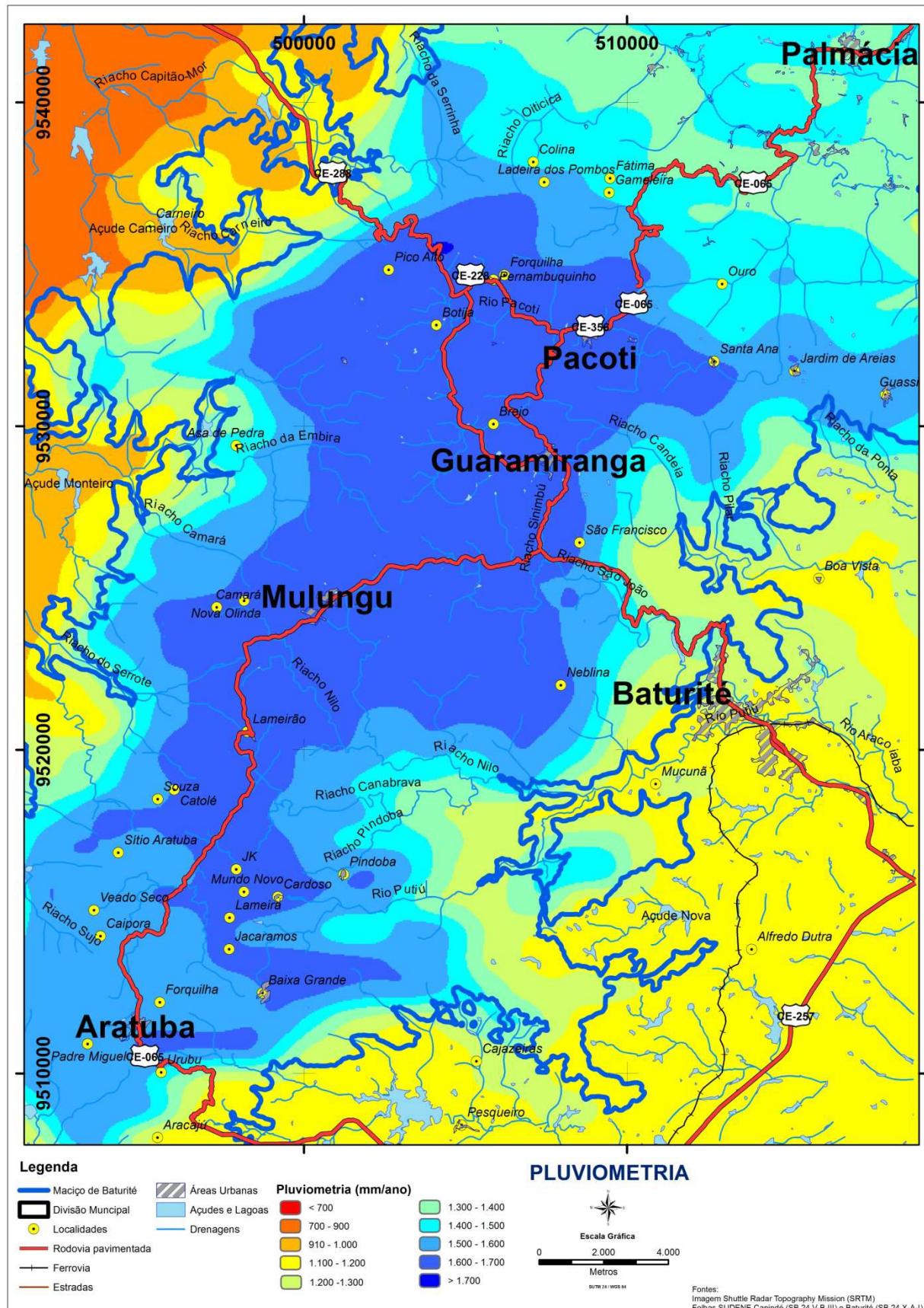
A serra e seu entorno imediato apresentam índices pluviométricos acima de 1.400 mm/ano, embora a vertente a sotavento, nas proximidades de Caridade, esses índices caiam para algo em torno de 700 mm/ano, por outro lado, em uma extensa área a barlavento, as precipitações fiquem em torno de 1.100 mm/ano, corroborando com o predomínio das chuvas de gênese orográfica (Figura 44).

A maior parte da zona de cimeira da serra apresenta índices na faixa dos 1.600 mm/ano com pequenas áreas no município de Guaramiranga com taxas acima desse índice.

Aratuba e Pacoti são os municípios que apresentam maior amplitude pluviométrica, enquanto Guaramiranha e Mulungu são os que registram os maiores volumes de chuva, seguidos por Aratuba e Palmácia.

No setor oeste da região, pode-se observar que os índices pluviométricos decrescem já muito próximo à serra, com taxas abaixo dos 700 mm/ano, enquanto que no setor leste, há uma ampla área com os índices pluviométricos acima dos 1.000 mm/ano a partir de Baturité em direção à Capistrano e Aracoíaba.

Figura 44 – Pluviometria da Serra Baturité



Fonte: Modificado de *WorldClim* (2012)

5.4.1 Erosividade

No que diz respeito à erosão laminar, a semelhança da distribuição das faixas de isoerosividade na Serra de Baturité com as isoetas pluviométricas comprovam a grande influência orográfica das chuvas que ocorrem na região e o controle que a topografia exerce sobre a pluviosidade e a erosividade da região.

A erosividade (R) varia entre 4.500 a 7.700 Mj.mm ha.h.ano, com os menores valores a sotavento da serra e os maiores, entre os municípios de Pacoti, Guaramiranga e Aratuba.

Apenas na zona de cimeira os valores de erosividade passam dos 7.500 Mj.mm ha.h.ano, enquanto nas vertentes os valores ficam entre 6.500 e 7.500 Mj.mm ha.h.ano e na depressão periférica, abaixo dos 6.000 Mj.mm ha.h.ano, sendo o setor oeste o que apresenta os menores valores (Figura 45).

A despeito da influência orográfica, o contexto meteorológico em mesoescala que influencia a região, são os sistemas predominantes da região semiárida do nordeste brasileiro – um regime de precipitação temporal irregular com chuvas intensas e de curta duração, que resulta em elevado potencial erosivo.

Por estar submetida a um regime regional tropical com pluviosidade até 1.700 mm/ano, os índices de erosividade na região da serra de Baturité não apresentam valores extremos, como é comum em regiões de alta pluviosidade, como o sudeste brasileiro, ou em áreas semiáridas do sertão nordestino.

Apesar da erosividade ser maior na zona de cimeira, a vegetação mais adensada nesse setor é um fator atenuador da erosão, e desse modo, os valores de R na serra de Baturité e seu entorno não atingem os limites extremos, segundo a classificação de Carvalho (1994), variando entre 500 e 1.000 tm.mm. ha.ano (Figura 46).

Figura 45 – Erosividade na Serra de Baturité

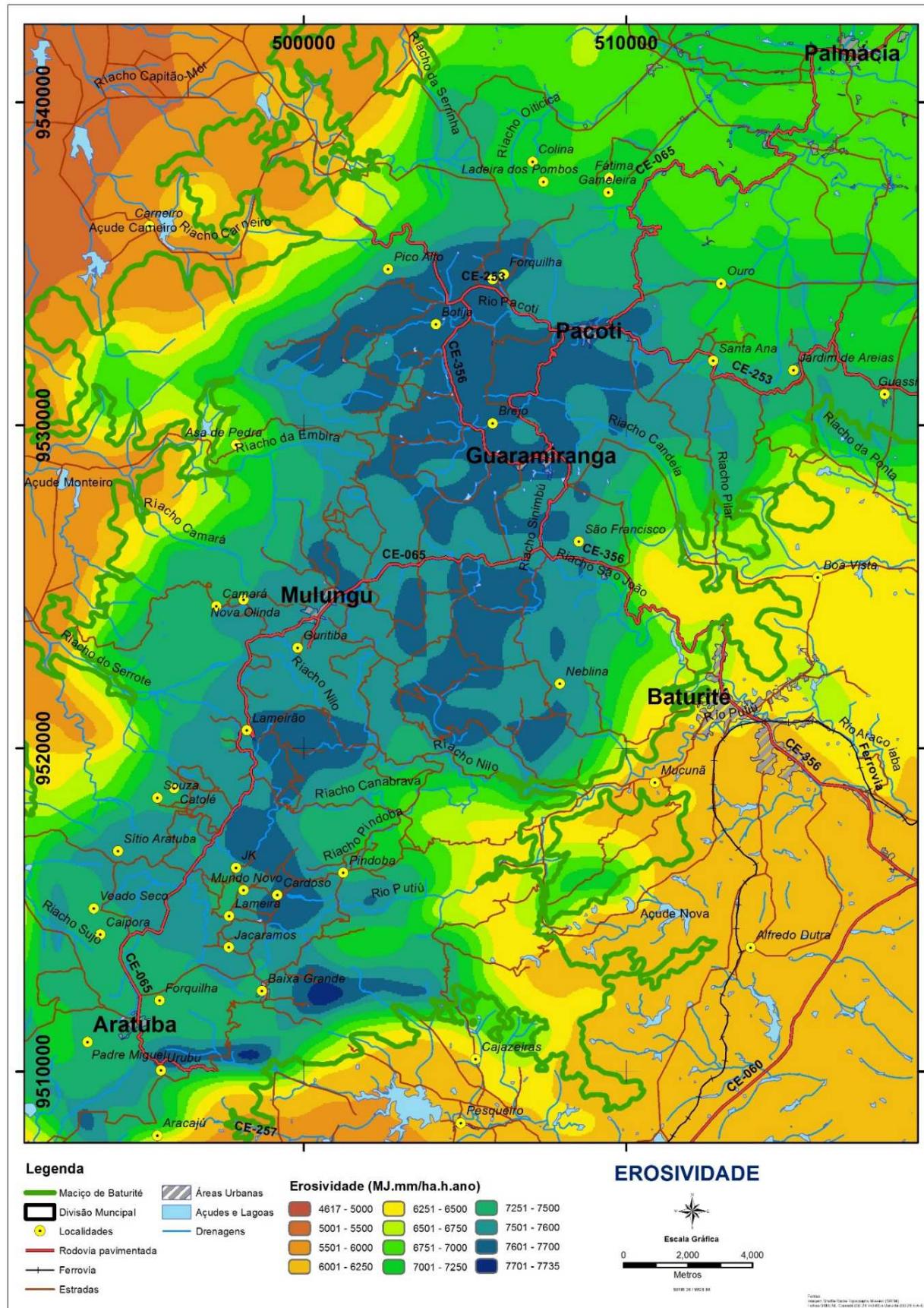
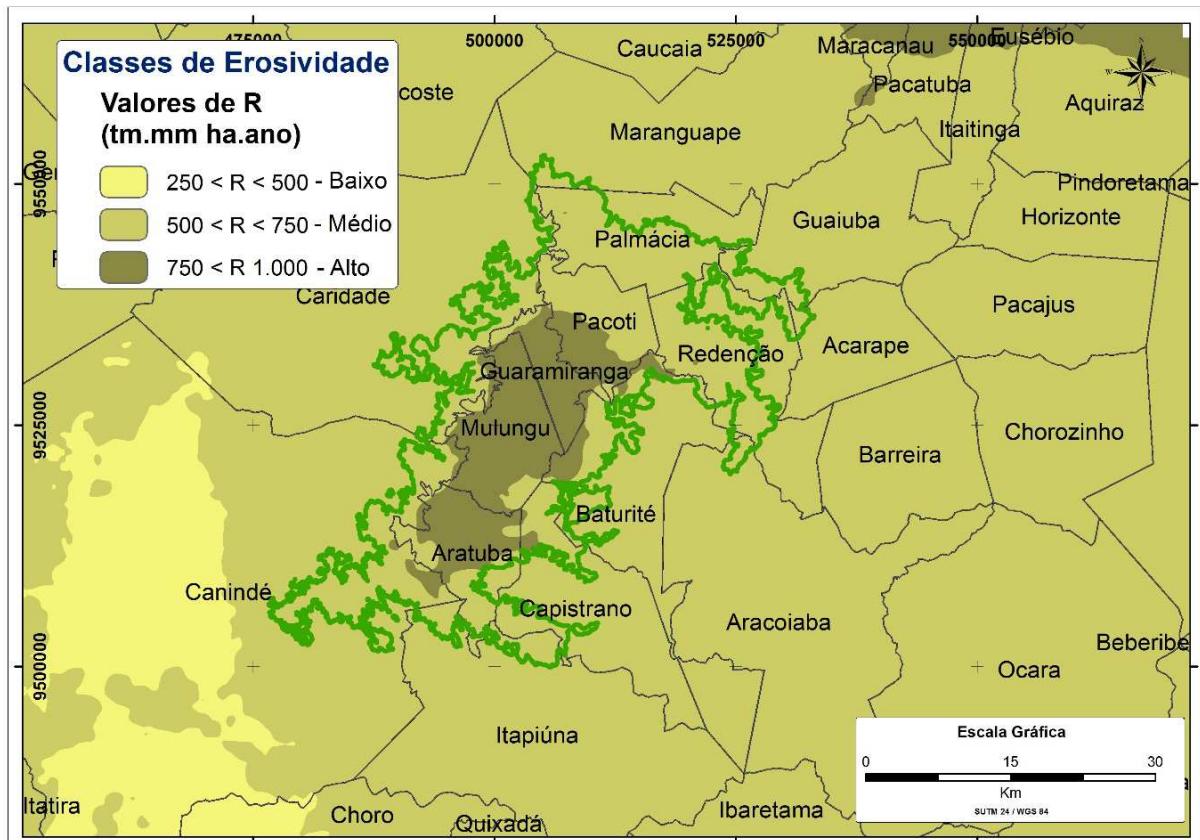


Figura 46 – Classes de erosividade da Serra de Baturité no contexto regional.



Fonte: Elaborado pelo Autor

5.5 Associação de Solos

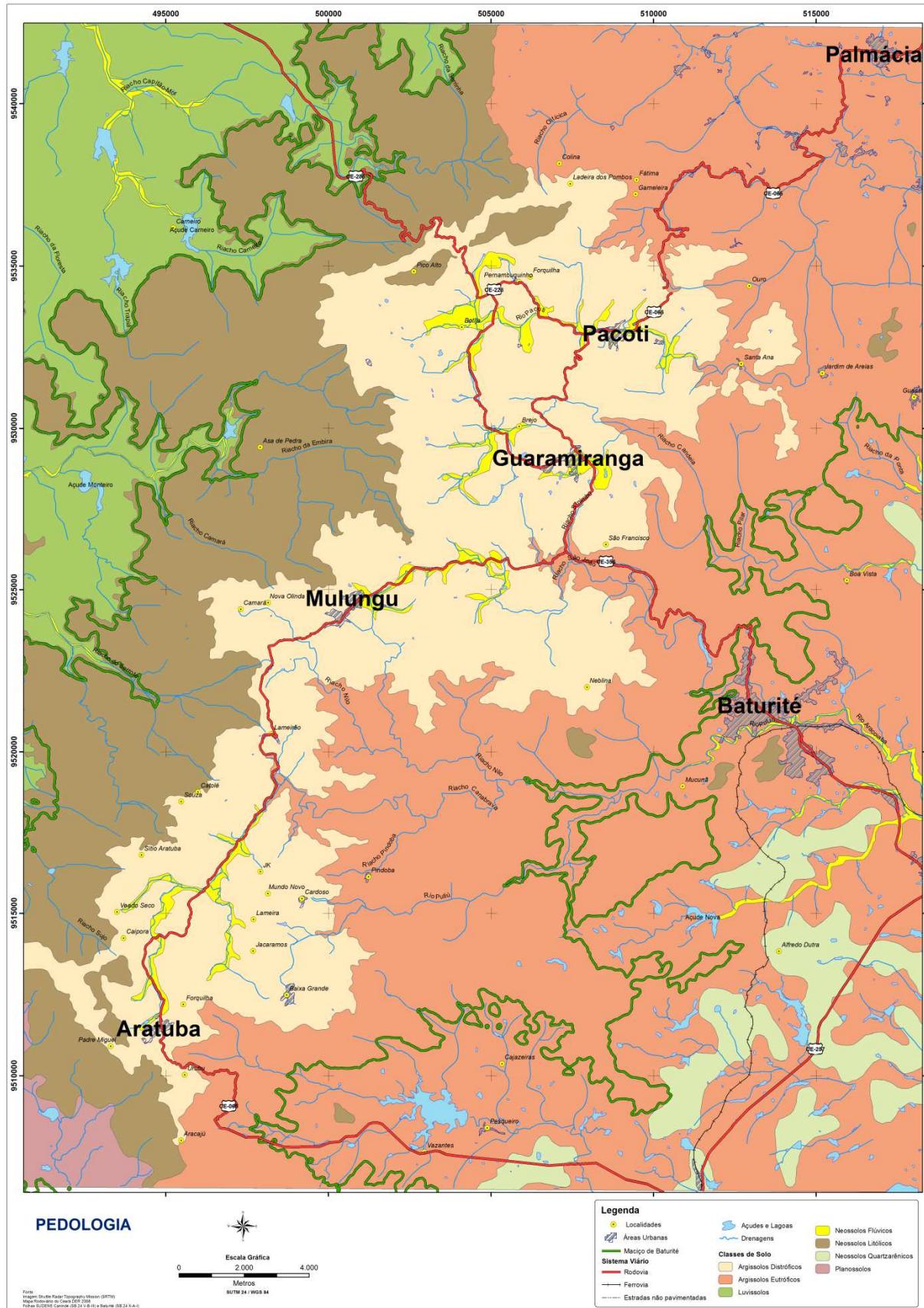
A região do Maciço de Baturité apresenta grande diversidade pedológica, sendo os mais comuns os Argissolos, Luvissolos, Planossolos, Neossolos Litólicos e Regolíticos (Lima e Preira, 1983 apud Barbosa, 2008). Os principais trabalhos de mapeamento pedológico datam da década de 70, pelo Ministério da Agricultura, que realizou o mapeamento sistemático exploratório das associações de solo em escala 1:600.000.

No entanto, trabalhos acadêmicos posteriores, como o de Barbosa (op cit) apontaram a ocorrência de outras classes, como os Cambissolos, tanto na vertente úmida como seca, embora em termos de mapeamento, os trabalhos mais recentes baseiam-se ainda no mapeamento da Embrapa, na década de 70, como é o caso do trabalho de Bétard, Peulvast e Sales (2007) e de Bastos (2012), que utiliza as classes citadas no referido mapeamento.

Neste trabalho, foram feitas modificações no mapa de solos da região, adaptando os contornos das classes às principais unidades geomorfológicas, como mostra a figura 47. Essas classes apresentam condições diferenciadas para instalação de processos erosivos, tanto lineares como laminares, com base em sua textura, estrutura e permeabilidade

Esses aspectos foram levantados em campo em amostras que determinaram as taxas de permeabilidade e erodibilidade e buscou-se na literatura, para efeito comparativo com os dados levantados em campo, as taxas de erodibilidade das classes de solo apresentadas na figura 49 foram reclassificadas de acordo com sua intensidade.

Figura 47 – Principais associações de solo da Serra Baturité



Fonte: Modificado de Bastos (2012)

5.5.1 – Erodibilidade

Como mencionado anteriormente, os resultados de erodibilidade que utilizam o modelo USLE servem para quantificar e qualificar a suscetibilidade à erosão laminar, bem como para estimar a perda de solo em pequenos talhões de terra compatíveis com o uso agrícola (Baptista, 2003).

Como este trabalho se trata de um mapeamento em escala regional, o uso das técnicas de geoprocessamento, mesmo subsidiada com dados de campo, não permite estimar a perda de solo por erosão laminar, mas como é possível considerar praticamente todos os fatores envolvidos no processo de erosão laminar, é possível avaliar qualitativamente grandes áreas e estabelecer classes ou graus de suscetibilidade a erosão laminar em regiões homogêneas (Baptista, *op cit*).

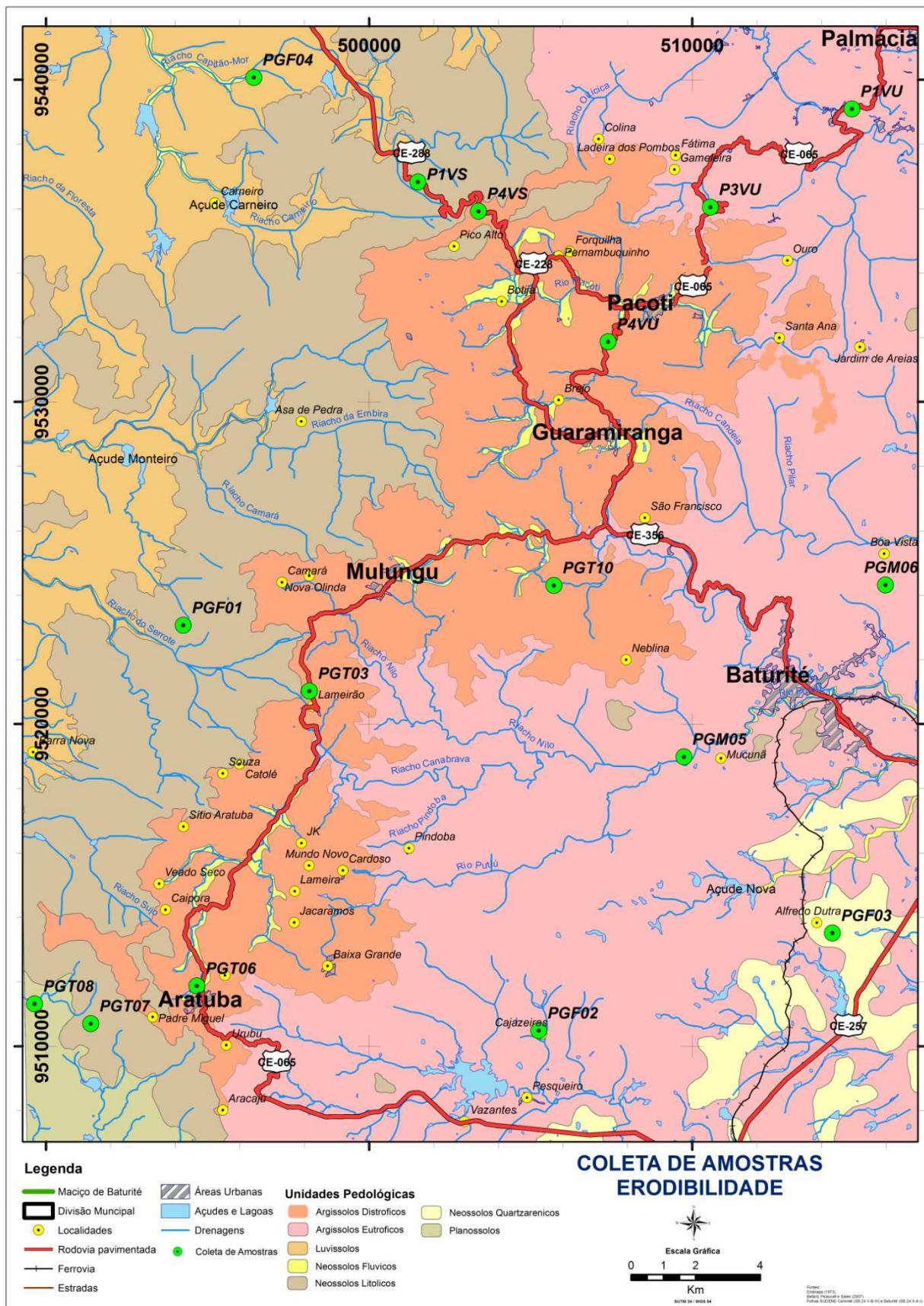
Como o fator erodibilidade reflete a suscetibilidade a erosão para cada tipo de solo, a coleta de amostras considerou a tipologia pedológica onde os resultados obtidos através do método acima citado, foram extrapolados para as classes de solo em que as coletas foram feitas (Figura 48).

Dessa forma, o mapa de solos foi associado aos valores obtidos nos cálculos de erodibilidade extraídos a partir dos ensaios geotécnicos obtidos com as amostras em campo para compor o mapa de erodibilidade com base nos dados levantados, com os valores de K correspondentes aos valores obtidos nos ensaios.

Foram também pesquisados na literatura os resultados médios de erodibilidade para cada classe de solo em diferentes regiões do Brasil e utilizados, para efeito comparativo, os resultados de K encontrados nesses trabalhos com os tipo de solo que ocorrem na região de estudo.

Assim, obtiveram-se dois mapas de erodibilidade: um com base nos dados levantados em campo, e outro, para efeito comparativo, com os dados de K extraídos na literatura.

Figura 48 – Pontos de coleta de amostra para ensaios de erodibilidade e classes de solo



5.5.1.1 – Erodibilidade com base na literatura

No mapa de erodibilidade feito a partir de dados extraídos na literatura, foram utilizados valores de K obtidos a partir dos trabalhos de Baptista (2007), que elaborou um diagnóstico de risco de erosão laminar para o Distrito Federal com ênfase em aplicação de recursos de geoprocessamento, e nos valores obtidos por Maniggel (2002) para 25 perfis de solo de São Paulo através da equação de Bouyoucos (Bertoni e Lombardi Neto, 1990).

No casos em que não havia classes de solo correspondente entre os trabalhos citados e os tipo de solo que ocorrem na região de estudo, considerou-se a suscetibilidade a erosão com base na classificação de Salomão (1999) e Ross (2005), que utiliza critérios como a textura e o tipo de solo para estabelecer as classes de erodibilidade (Quadro 17).

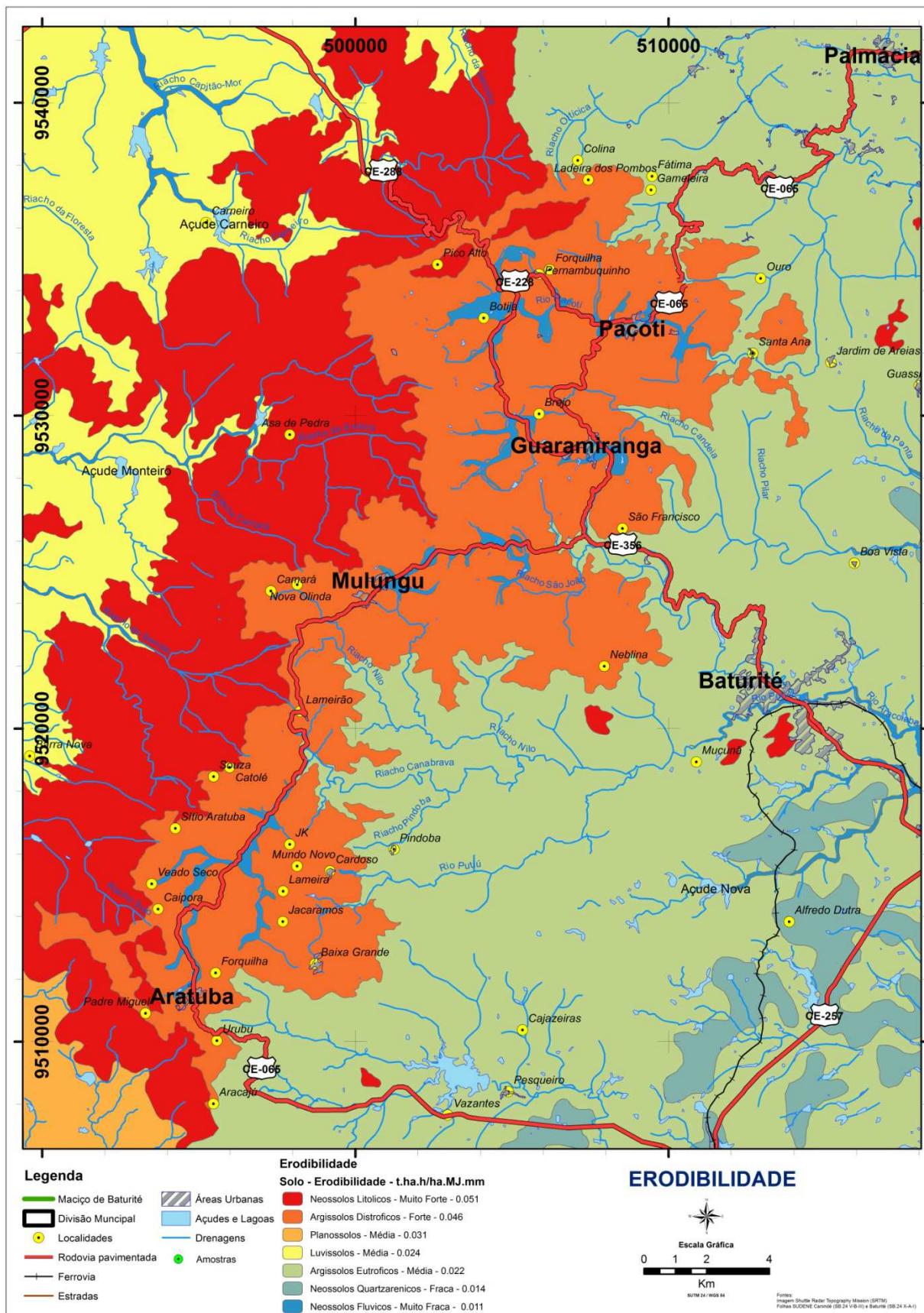
Quadro 17 – Classes de suscetibilidade a erosão laminar

GRAU DE ERODIBILIDADE	UNIDADES PEDOLÓGICAS
I – MUITO FRACO	Latossolo Roxo, Latossolo Vermelho escuro e Vermelho amarelo de textura argilosa, Solos hidromórficos em relevo plano, Gleissolos, Planossolos, Organossolos, Neossolos Quartzarênicos em relevo plano.
II - FRACO	Latossolo Amarelo e Vermelho amarelo de textura média argilosa, Terra Roxa estruturada, Latossolo Vermelho escuro.
III - MÉDIO	Argissolo Vermelho Amarelo e Argissolo vermelho escuro, textura argilosa, Latossolo Vermelho Amarelo, textura argilosa a média, Latossolo Vermelho Amarelo, Terra Bruna.
V - FORTE	Argissolo Vermelho Amarelo não abrupto, textura média-argilosa e média, Cambissolos, Argissolos Vermelho Amarelo de textura médio-argilosa, Plintossolos.
V – MUITO FORTE	Cambissolos, Neossolos Litólicos, Argissolos Vermelho Amarelo e Vermelho escuro abrupto, textura arenosa média, Neossolos Quartzarênicos em relevos suave ondulado.

Fonte: Salomão (1999) e Ross (2005).

No caso, os valores de erodibilidade dos luviissolos e dos neossolos litólicos apresentados na mapa de erodibilidade com base nos valores obtidos na literatura, foram estimados com base na classificação de Salomão (*op cit*), considerando os valores das outras classes de solo (Figura 49).

Figura 49 – Erodibilidade na região da Serra de Baturité



Fonte: Adaptado de Salomão (1999) e Ross (2005)

5.5.1.2 Erodibilidade por amostragem

A erodibilidade calculada com base em 16 (dezesseis) amostras de solo (horizonte A) em que foram levantadas as composições granulométricas e de matéria orgânica e as taxas de permeabilidade em laboratório permitiu traçar um quadro comparativo com a erodibilidade obtida por outros autores, como Salomão (1999), Bertoni & Lombardi Neto (1993) e Ross (2005) para as diferentes classes de solo em regiões tropicais.

Com os dados de permeabilidade, matéria orgânica e granulometria coletadas nos pontos de amostragem da permeabilidade, pode-se obter o cálculo de erodibilidade por um método indireto, no caso, o nomograma de Wischmeier *et al* (1978).

5.5.1.2.1 Granulometria

Os ensaios granulométricos nas 16 (dezesseis) amostras de solo levantadas apontaram que apenas 02 (duas) apresentam mais de 50% de finos e 01 (uma) mais de 50% de areia grossa, havendo portanto, o predomínio de solos com textura franca ou franco arenosa e com mais de 50% de areia.

A amostra feita no Planossolos (PGT08) apresentou a maior proporção de areia grossa, enquanto todas as amostras do setor norte da região de estudo apresentaram maior proporção de silte e argila e as amostras coletadas nos argissolos eutróficos apresentaram maior proporção de areia fina. (Figura 58 e Quadro 19).

Os dados da análise granulométrica, que foram feitos pelo método do peneiramento, como gramas retidas em cada peneira, composição e curva granulométrica, estão no anexo.

5.5.1.2.2 Matéria Orgânica (M.O)

Das 16 (dezesseis) amostras de solo levantadas, 50% apresentaram percentual de M.O inferior a 2%. As amostras com maior teor de matéria orgânica são aquelas localizadas no setor nordeste da área de estudo correspondendo às amostras P1VU, P3VU e P4VU em Argissolos Distróficos e Eutróficos, ou em

Cambissolos, segundo o trabalho de Barbosa (2008). Isso se deve ao fato dessa região apresentar maior pluviosidade e estar recoberta pela vegetação da Floresta Perenifólia Plúvio-Nebular (Mata Úmida).

Os solos no setor sul e sudeste da região apesentam teor muito baixo de M.O, principalmente a amostra PTG08, em Planossolo, área que corresponde biogeograficamente à Caatinga e possui menores índices pluviométricos (Figura 58 e Quadro 19).

5.5.1.2.3 Permeabilidade

O cálculo de permeabilidade foi realizado a partir de permeâmetros de carga variável em amostras indeformadas coletadas em campo. Alguns pontos de coleta de amostra foram obtidos de trabalhos anteriores, como o de Barbosa (2008), que estudou a evolução pedogenética das duas vertentes da serra de Baturité com base em algumas amostras de campo através de parâmetros morfológicos, físicos e químicos.

Nesses pontos, (P1VU, P3VU, P4VU, P1VS e P4VS), o cálculo de erodibilidade foi possível com mais uma visita a campo, nos pontos acima citados, para a coleta de amostra indeformada para o ensaio de permeabilidade, uma vez que no referido trabalho, matéria orgânica, estrutura e granulometria, os outros parâmetros necessários para aplicação do Nomograma de Wischmeier *et al* (1978), já haviam sido obtidos na referidas amostras.

Nos outros pontos de coleta de amostra (PGM3, PGM5, PGT03, PGT06, PGT07, PGT08, PGT10, PGF01, PGF02, PGF03, PGF04), foram feitas coletas para todos os ensaios, incluindo matéria orgânica e granulometria, além claro, da coleta de amostra indeformada.

No Quadro 19 constam as coordenadas, os valores, a classificação e as categorias de permeabilidade segundo o método adotado. Na figura 57 pode-se observar a relação entre a velocidade de permeabilidade no solo e sua classe.

Todas as amostras nos Neossolos Litólicos, na vertente ocidental da serra, apresentaram escoamento muito lento, assim como a maioria das amostras nos argissolos distróficos, na zona de cimeira.

Por outro lado, nos setores sudeste e nordeste da área de estudo, em argissolos eutróficos e neossolos quartzarênicos, as taxas de permeabilidade variaram de moderada a rápida.

Tal diferenciação de taxas de permeabilidade em uma ampla área classificada como argissolos, pode ser na verdade, outra classes de solo. Possivelmente, os Cambissolos identificados por Barbosa (2008) no setor entre Palmácia e Pacoti, o que implica em velocidades de permeabilidade distintas dos Argissolos encontrado próximos à Baturité.

6 RESULTADOS - MOVIMENTOS DE MASSA E EROSÃO

6.1 Movimentos de Massa

A partir da sobreposição dos Documentos Fundamentais básicos em ambiente SIG e com a aplicação de técnicas de álgebra de mapas foi possível elaborar dois sub-produtos de predição a riscos de movimentos de massa no Maciço de Baturité: o Mapa de Suscetibilidade a Movimentos de Massa e o Mapa de Riscos ao Sistema Viário.

O primeiro foi obtido pela sobreposição dos mapas de declividade, densidade de lineamentos estrurais (km/km^2) e litologias. O segundo, a partir dos mapa de orientação das vertentes, declividade e através dos dados de foliação, como direção e mergulho.

A técnica de análise espacial utilizada foi a Álgebra de Mapas, onde cada fator que contribui para a ocorrência de um evento recebe um peso ou influência relativo à sua importância na deflagração do evento ou processo. A seguir, é feita a soma dos pesos de cada fator gerando um mapa com zonas de risco.

O processo foi feito na ferramenta *Weighted Overlay*, do ArcGIS, onde as influências e pesos de cada fator e classe foram determinados como mostra o quadro 18.

No mapa de Suscetibilidade a Movimentos de Massa, foram atribuídos pesos aos fatores declividade, lineamentos e litologias. Cabendo à declividade o maior peso como fator deflagrador, seguido pela litologia, e pelos lineamentos estruturais.

A atribuição de pesos é feita com base em princípios lógicos de acordo com as características de cada classe de todos os fatores. Assim, as declividades mais altas possuem peso maior que as mais baixas, as zonas com maior concentração de juntas e fraturas, peso maior que os setores menos fraturados e os xistos e gnaisses, devido sua foliação e planos de fraqueza, peso maior que os granitos e quartzitos, mais maçicos.

Como resultado, o Mapa de Suscetibilidade a Movimentos de Massa, que foi classificado em Muito Alto, Alto, Médio, Baixo e Muito Baixo, mostra uma forte

correlação entre as declividades acima de 30% e risco Muito Alto de movimentos de massa.

Quadro 18 – Relação de Pesos e Influências dos fatores e classes utilizados na álgebra de mapas para elaboração do mapa de Suscetibilidade a Movimentos de Massa.

DECLIVIDADE	
Influência de 50%	Pesos
0 – 5 %	0,0
5,1 – 15%	1,0
15,1 – 30%	2,0
30,1 – 45%	3,0
> 45%	4,0
LITOLOGIAS	
Influência de 30%	Pesos
Argilas, Argilas e Cascalhos	1,0
Metacarbonatos, Migmatitos, Pegmatitos e Calcissilicatos	1,0
Anfibolitos	2,0
Granitos	2,0
Gnaisses	3,0
Quartzitos	3,0
Xistos	4,0
DENSIDADE DE LINEAMENTOS	
Influência de 20%	Pesos
Muito Baixa	0,0
Baixa	1,0
Média	2,0
Alta	3,0
Muito Alta	4,0

Fonte: Elaborado pelo Autor.

A densidade de lineamentos estruturais, que foi reclassificada também como Muito Alto, Alto, Médio, Baixo e Muito Baixo de acordo com a concentração de quilômetros de lineamentos por quilômetros quadrados (km/km^2), apresentou nos setores Alto e Muito Alto, forte correlação com as classes Médio e Alto do Mapa de Suscetibilidade a Movimentos de Massa, enquanto as litologias associadas à

Unidade Independência, particularmente os xistos, apresentaram forte correlação com as zonas de Médio a Muito Alto risco a movimentos de massa.

Foram inseridos os pontos de ocorrência de processos naturais (deslizamentos, queda de blocos e fluxos de lama) obtidos a partir do trabalho de Bastos (2012) como forma de avaliar a correspondência entre as zonas de riscos e os pontos onde efetivamente ocorreram movimentos de massa e constatou-se que todos os processos ocorreram em setores zoneados como Alto ou Muito Alto risco, comprovando a fiabilidade do método adotado e os pesos atribuídos.

O Mapa de Suscetibilidade a Movimentos de Massa representa as zonas de maior e menor risco a movimentos de massa, com base em três critérios: declividade, estruturas lineares e litologia. Em alguns setores classificados como de Muito Alto Risco não foram identificado movimentos de massa, mas isso se deve em grande parte, por não haver rodovias e estradas importantes nesses setores.

Observa-se também que alguns processos naturais ocorreram em zonas de baixa densidade de lineamentos, no entanto, trata-se de zonas de altas declividades em xistos ou quartzitos, o que mostra que de fato, a declividade e a litologia tem influências maiores que as juntas ou fraturas na deflagração de movimentos de massa, embora esse seja um fator que também exerce inegável influência quando ocorre adensadamente, como é o caso do setor nordeste da serra.

Essa é a área de maior concentração de lineamentos, e vários eventos de movimentos de massa ocorrem nesse setor, mesmo sendo uma área representada geologicamente pelos migmatitos do Complexo Tamboril-Santa Quitéria, onde a litologia apresenta textura mais coerente e massiva e não apresenta a suscetibilidade aos movimentos de massa que os xistos apresentam.

Algumas exceções de ocorrências de processos naturais fora das zonas de maiores riscos estão associadas a abertura de rodovias, que são certamente, outro importante agente deflagrador de movimentos de massa, principalmente quando os fatores declividade, litologia e foliação concorrem para o aumento do risco.

Considerando o sistema viário como outro agente deflagrador, e por ser justamente nas estradas e rodovias que ocorrem a quase totalidade desses eventos na área de estudo, foi elaborado também o Mapa de Riscos ao Sistema Viário, que mostra os trechos das principais vias da região em diferentes graus de risco a movimentos de massa.

Nesse mapa, os fatores considerados na determinação dos trechos de risco foram declividade, orientação das vertentes e foliação. Novamente, a declividade é o fator preponderante na deflagração de movimentos de massas em trechos viários, no entanto, os riscos podem ser amenizados caso a vertente esteja orientada em sentido oposto à direção do mergulho da foliação.

Para estabelecer essa relação, os trabalhos de campo envolveram a coleta de atitudes em taludes em vários trechos de rodovias e estradas. Com esses dados, foi feita a sobreposição do *layer* declividade com o de orientação das vertentes, com a consideração da direção e mergulho da foliação.

As zonas de baixa decividade correspondentes geomorfologicamente à baixa Planície Cristalina (< 15%) apresentam riscos muito baixos aos sistema viário, e na zona de cimeira, onde predomina declividades entre 16 a 30%, os riscos são considerados baixos.

Os setores de maior risco são justamente as vertentes oriental e ocidental, em especial a ocidental, cuja litologia predominante xistosa é outro importante condicionante, como já mencionado.

No entanto, alguns trechos rodoviários de alta declividade apresentam predominantemente médio risco, como é o caso da rodovia CE-065, trecho entre Aratuba e Capistrano, cujo foliação mergulha para SW em baixos ângulos (< 25°), mesmo sentido da maioria dos techos da rodovia nesse setor.

Por outro lado, as rodovias CE-288, trecho Pacoti-Caridade e CE-065, trecho Palmácia-Pacoti, são os que apresentam maior risco de ocorrência de movimentos de massa. Ambos os trechos apresentam setores com alta declividade (> 45%), por vezes em litologias xistosas e quartzosas, cuja foliações mergulham perpendicularmente ou em direção á estrada em ângulos acima de 25°.

Na rodovia CE-065 a foliação possui *trend* N ou NE-SW e os trechos onde há mais registros de movimentos de massa estão voltados para SE e SW e na rodovia CE-288, os trechos rodoviários assumem riscos Alto ou Muito Alto depois da localidade de Pernambuquinho.

Na maioria do trechos dessa rodovia e das estradas da vertente ocidental da serra de Baturité, a foliação mergulha em direção a estrada e a ocorrência de xistos e quartzitos muito fraturados condiciona a queda de blocos, além dos deslizamentos, que são o tipo de movimento de massa mais comum na região (Figuras 50, 51 e 53).

Na estrada que liga Mulungu a Caridade há um sistema de dobras que divide a foliação num trecho com mergulho para E e em outro para W, e que por sua vez, possui vertentes estruturadas justamente por essa dobra orientadas em E-W, impondo a essa estrada o mais longo trecho de alto risco.

Figura 50 – Trecho de contato entre quartzito e xisto na CE-288 com muitas juntas e fraturas e foliação mergulhando em direção à estrada. (Coordenadas 503939/9535485 UTM24S/WGS84)



Fonte: Autor

Figura 51 – Queda de blocos em estrada que liga Mulungu à Caridade. Litologia xistosa com foliação S45W/35SW na mesma direção da estrada e da orientação da vertente. (Coordenadas 494248/9523070 UTM24S/WGS84)



Fonte: Autor.

A estrada que liga a localidade de Baixa Grande, no município de Aratuba, a Baturité, pela vertente oriental da serra, não é pavimentada e está classificada no Mapa de Suscetibilidade de Movimentos de Massa, como zona de risco Muito Alto.

Figura 52 - Risco de tombamento na CE-288 de blocos de xistos com foliação N80W/35NW na mesma direção da estrada e da orientação da vertente. (Coordenadas 502279/9536329 UTM24S/WGS84)



Fonte: Autor

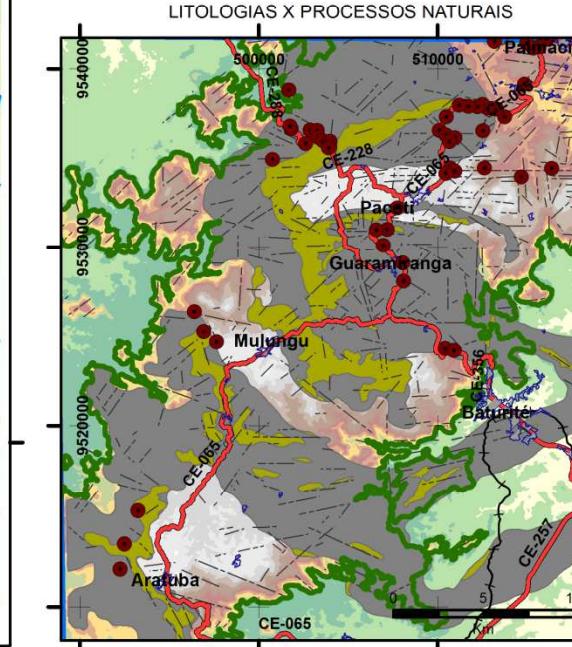
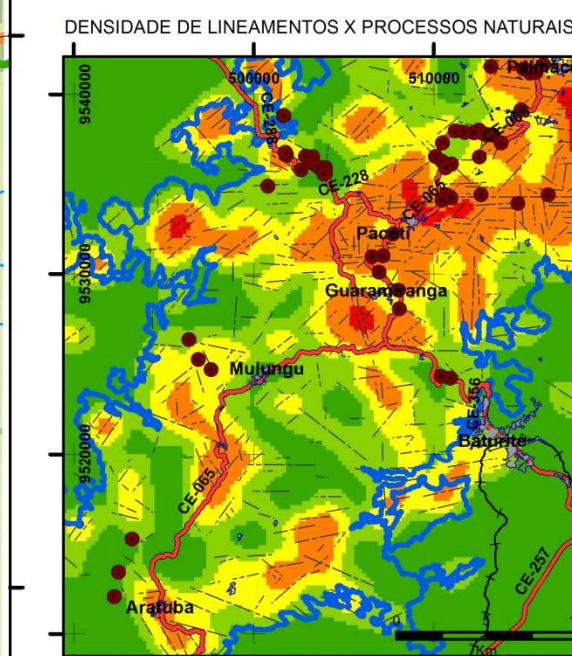
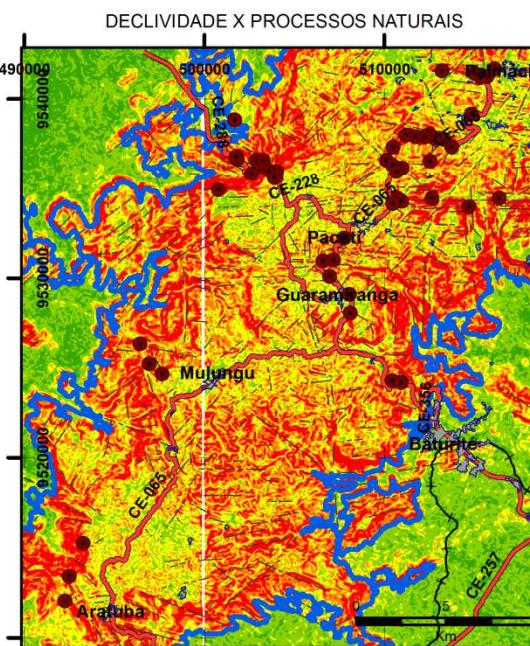
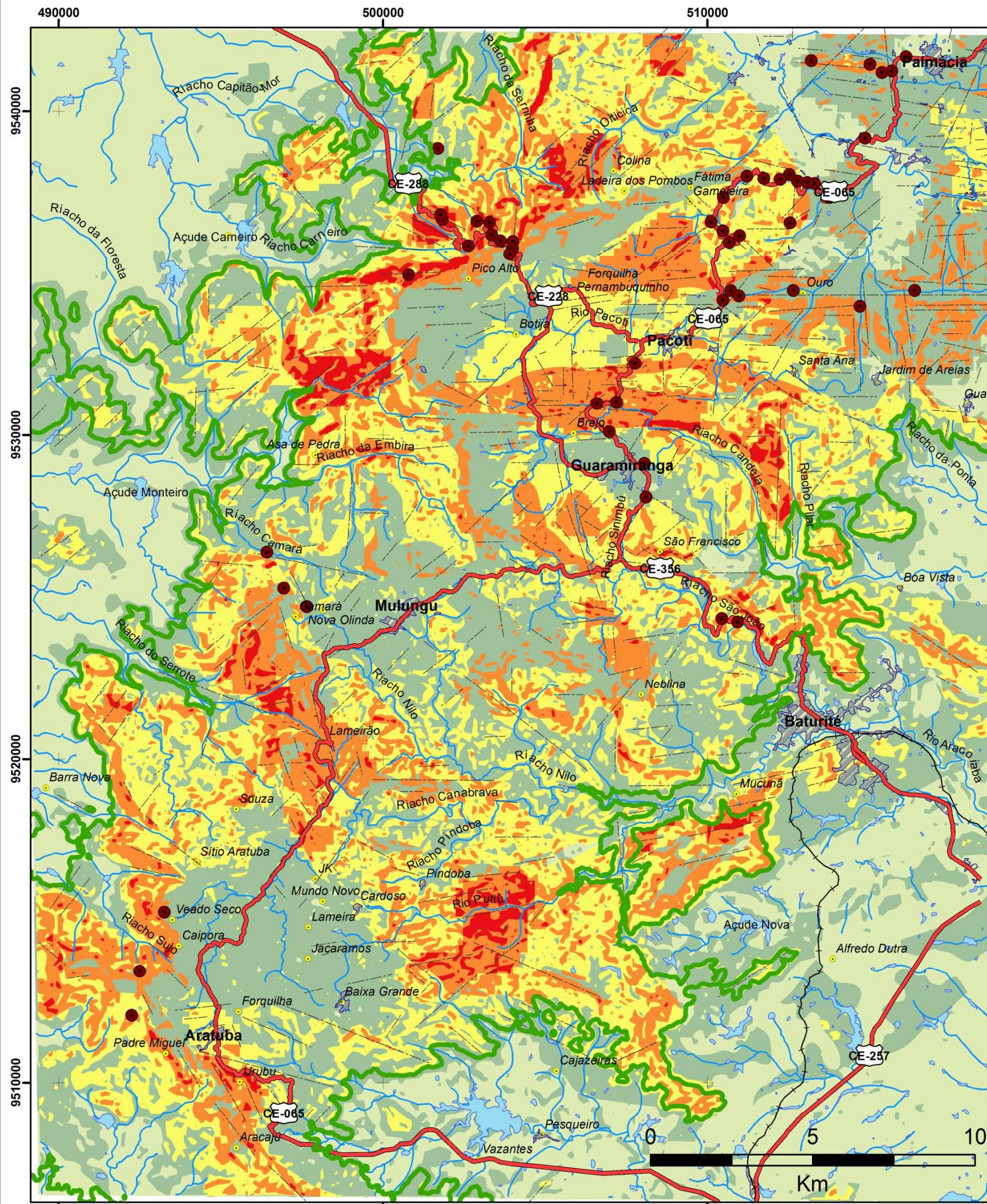
A pavimentação desse trecho implicaria em aumento dos riscos rodoviários caso não sejam adotadas medidas de contenção geotécnica nos taludes. Aliás, a carência dessas medidas é notória em vários trechos das principais rodovias e estradas da região.



SUSCETIBILIDADE A MOVIMENTOS DE MASSA

UTM24S/WGS84

UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
Centro de Ciências
Departamento de Geologia
Programa de Pós-Graduação em Geologia
GEOPROCESSAMENTO APLICADO AO
MAPEAMENTO GEOTÉCNICO EM
ESCALA REGIONAL - O CASO DA
SERRA DE BATURITÉ/CE
Cleitens Teixeira Batista
Orientador: César Ulisses Vieira Veríssimo



Legenda

- Áreas Urbanas
- Processos Naturais
- Lineamentos Estruturais
- Localidades
- ▲ Açudes e Lagoas
- ~ Drenagens

Sistema Viário Principal

- Ferrovia
- Rodovia

Suscetibilidade a Movimentos de Massa

- Muito Baixa
- Baixa
- Média
- Alta
- Muito Alta

Declividade

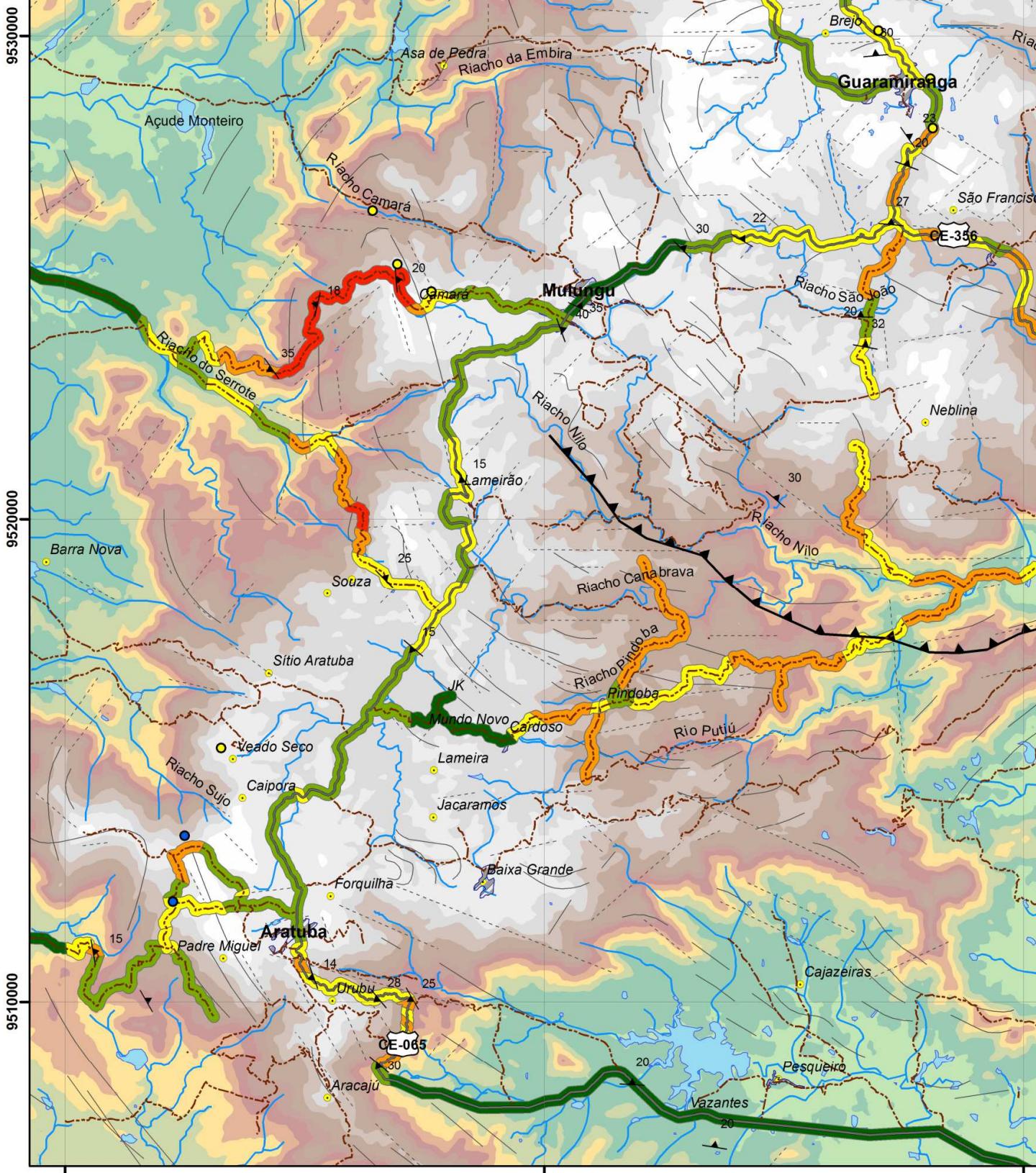
- 0 - 5
- 6 - 15
- 16 - 30
- 31 - 45
- > 45

Densidade de Lineamentos (Km/Km²)

- Muito Baixa
- Baixa
- Média
- Alta
- Muito Alta

Seleção Litologias

- Quartzito
- Xisto



RISCOS AO SISTEMA VIÁRIO

UNIVERSIDADE FEDERAL do CEARÁ
Centro de Ciências
Departamento de Geologia
Programa de Pós-Graduação em Geologia
GEOPROCESSAMENTO APLICADO AO
MAPEAMENTO GEOTÉCNICO EM
ESCALA REGIONAL - O CASO DA
SERRA DE BATURITÉ/CE
Cleistenes Teixeira Batista
Orientador: César Ulisses Viera Veríssimo



Escala Gráfica

0 2.000 4.000
Metros

UTM24S / WGS84

Legenda

	Áreas Urbanas		Foliações		Deslizamento
	Localidades		Atitudes Foliações		Lineamentos
	Drenagens		Rodovias		Queda de E.
	Açudes e Lagoas		Ferrovia		Queda de E.
	Estradas				Compressional
					Transcorrente
					Queda de E.
					Queda de E.
					Queda de E.

Zonas de Cisalhamento

6.2 Erosão

Como já mencionado anteriormente, destaca-se que o método USLE para determinação de erosividade e erodibilidade, é destinado à avaliação de erosão laminar. Para tanto, são necessários dados pluviométricos para calcular a erosividade e dados sobre os principais atributos do solo, como granulometria, permeabilidade, estrutura e matéria orgânica, para se calcular a erodibilidade.

A correlação do levantamento desses dados com as classes ou associações de solos da região permite avaliar a validade dos métodos adotados e estabelecer correlações.

A erosão laminar é um processo de detecção em campo mais difícil que a erosão linear, sendo mais lento e abarcando áreas de maiores extensões. Uma das formas de diagnosticá-la é através das raízes de árvores expostas, que denunciam a ocorrência de perda horizontal de perfis de solo.

Por outro lado, a erosão linear é mais pontual e deixa cicatrizes mais expressivas no solo. Na área de estudo, essas não atingem sua expressão máxima representada pelas voçorocas, mas em alguns setores, como na vertente seca da serra, as ravinas atingem dimensões significativas (Figura 55).

Figura 55 – Erosão linear em área de cultivo temporário próximo a Mulungu. (Coordenadas 501040/9525110 UTM24S/WGS84).



Fonte: Autor

Os sulcos de erosão linear podem ser observados indiscriminadamente em todos os setores topográficos da região, desde que prevaleça solos de textura predominantemente arenosa, e de preferência, descobertos de vegetação.

Com efeito, enquanto nos setores mais elevados e vegetados da serra, a erosão é mais recorrente em áreas que sofreram algum processo de antropização, como pastagens e lavouras ou abertura de caminhos e estradas, nos setores de vegetação mais rarefeita, a erosão ocorre mesmo em áreas não agricultadas ou associadas a abertura de caminhos (Figura 56)

Por outro lado, as áreas de agradação com declividades baixas ou nulas, como as planícies de inundação, apresentam-se como áreas não suscetíveis à ocorrência de erosão linear.

Figura 56 – Sulco erosivo na vertente seca da serra de Baturité. (Coordenadas 489407/9511315 UTM24S/WGS84)



Fonte: Autor

Segundo Salomão (1999), a abordagem de avaliação de suscetibilidade à erosão linear em escala regional, deve-se basear na análise integrada da paisagem, considerando fatores geológicos, geomorfológicos e pedológicos.

Num estudo do DAEE/IPT (1989) *apud* Salomão (1999), foram definidas áreas de diferentes suscetibilidades à erosão linear para o Estado de São Paulo. De acordo com esse estudo, as áreas mais propícias para a ocorrência de incisões lineares são setores das vertentes com declividade média ou alta, com elevados gradientes hidráulicos subterrâneos, em geral, regiões de cabeceiras de drenagem,

principalmente em encostas côncavas, que propicia uma maior concentração dos fluxos lineares superficiais.

Áreas favoráveis à concentração de fluxo de água, como solos de elevado gradiente textural, e condicionadas pelas formas de uso e ocupação, também apresentam elevado potencial para ravinamentos, mesmo em declividades menos acentuadas.

Baseado nos pressupostos do estudo acima mencionado, e considerando os componentes: declividade, formas das encostas, topografia e pedologia, foram estabelecidas zonas ou setores com maior predisposição para a ocorrência de erosão linear. Essas zonas foram identificadas e apresentadas no Mapa de Zoneamento Geotécnico Geral.

O panorama geral obtido com as análises pode ser observado no quadro 19 e nas figuras 57, 58 e 59. Os valores finais de erodibilidade obtidos pelo nomograma de Wischmeier *et al* (1978) apresentam uma boa correspondência com os valores obtidos na bibliografia.

A vertente ocidental, formada por Neossolos Litólicos apresenta permeabilidade muito lenta, baixos teores de matéria orgânica e erodibilidade acima de 0,5 t.ha.h/ha.Mj.mm.

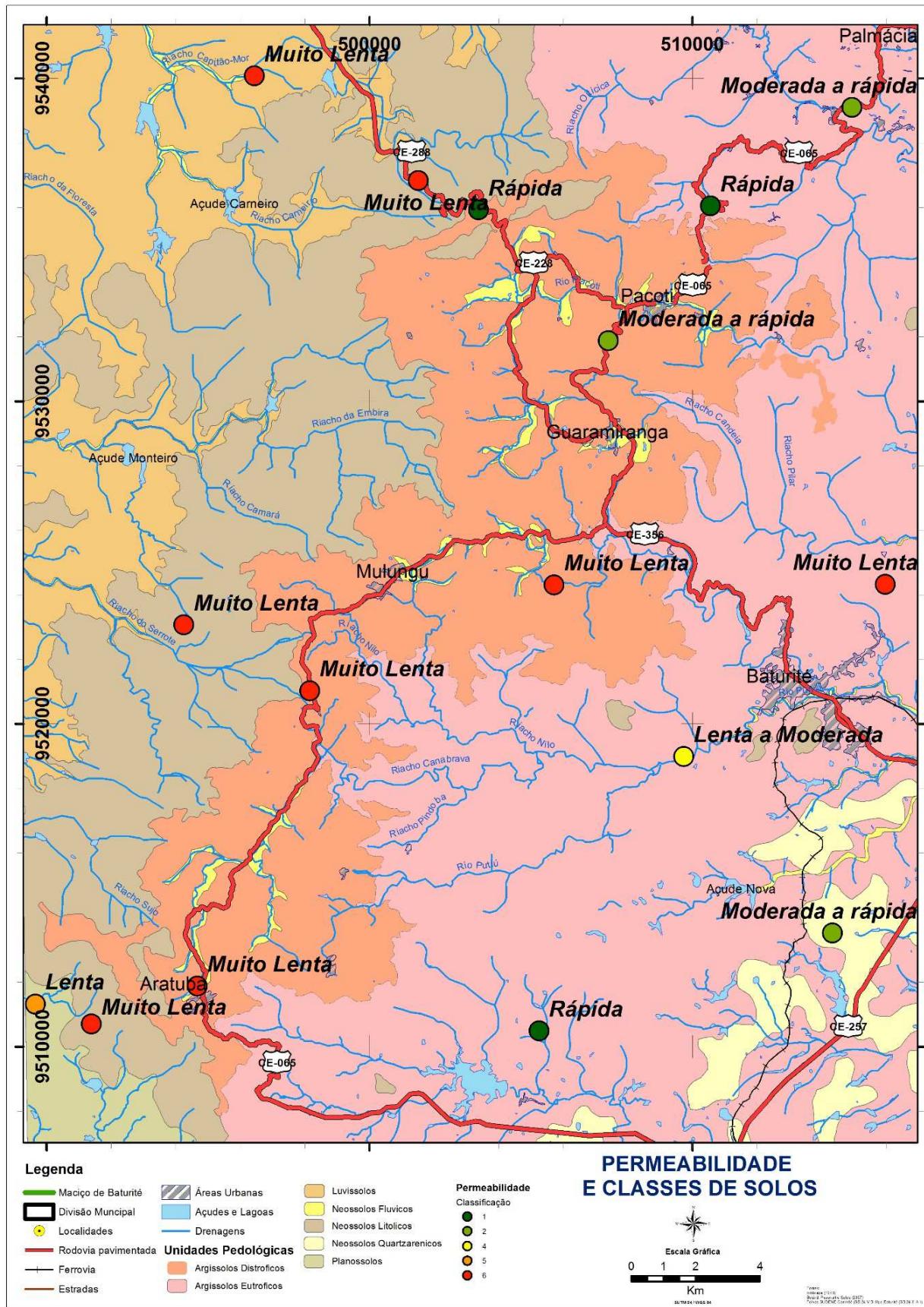
As amostras nos Argissolos Distróficos da zona de cimeira possuem erodibilidade acima de 0,4 t.ha.h/ha.Mj.mm, conforme obtido na bibliografia, exceto as amostras no setor nordeste da área de estudo, entre Palmácia e Pacoti, cujas amostras variaram entre 0,27 e 0,4 t.ha.h/ha.Mj.mm.

Nesse setor, as taxas de permeabilidade variaram entre moderada a rápida e rápida e as amostras apresentaram altas taxas de matéria orgânica e finos (silte e argila).

As maiores diferenças entre a erodibilidade obtida na literatura e a calculada pela amostragem ocorrem nos luviissolos e nos argissolos eutróficos, especialmente nas amostras coletadas no setor sudeste (PGM05, PGF2 e PGF3).

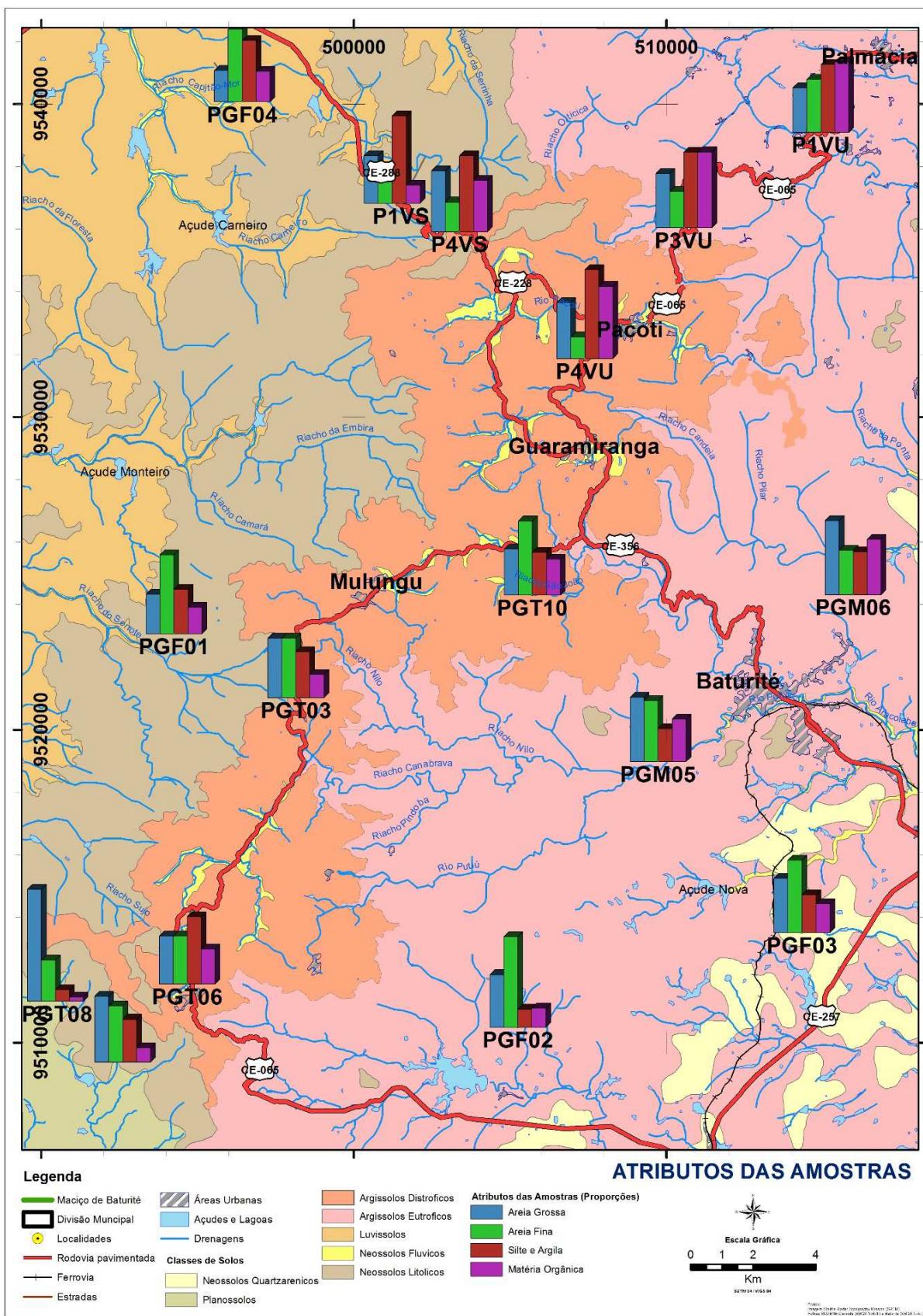
No entanto, em todos os casos, observa-se que a tendência de aumento de erodibilidade na vertente ocidental (Neossolos Litólicos e Luviissolos), seguidos Argissolos Distróficos da zona de cimeira.

Figura 57 – Distribuição espacial das categorias de permeabilidade



Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura 58 – Proporção de Areias. Finos e Matéria Orgânica das amostras



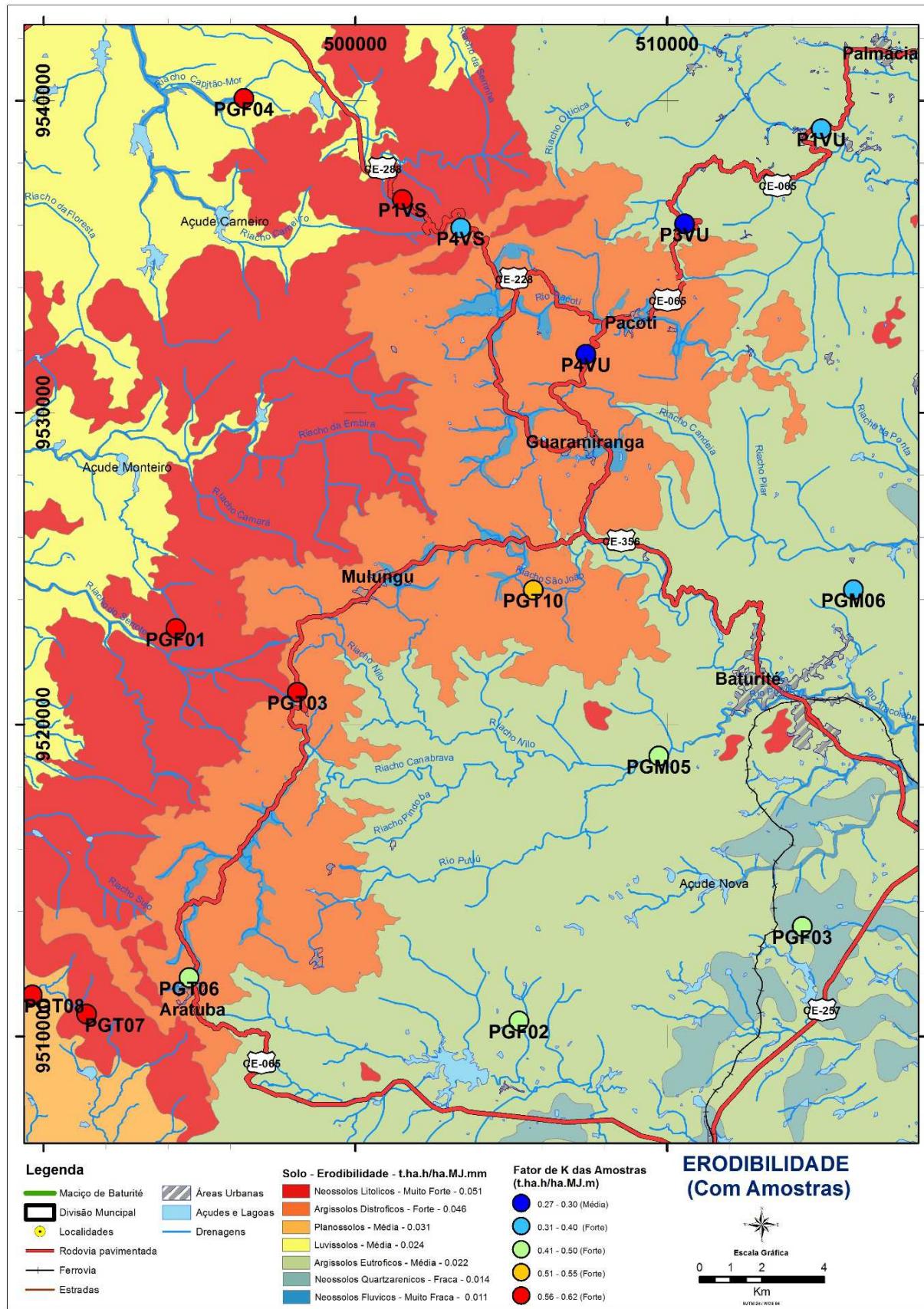
Fonte: Elaborado pelo Autor

Quadro 19 – Dados gerais da amostragem

Amostra	X	Y	Permeabilidade (cm/s)	Classificação	Categoria	Matéria Orgânica (%)	Areia Grossa (%)	Areia Fina (%)	Silte + Argila (%)	Classisificação Estrutural	Fator de K
P1VS	501511	9536832	2.8×10^{-5}	6	Muito Lenta	1.1	29	19	53	1	0.6
P1VU	514946	9539100	6.5×10^{-4}	2	Moderada a rápida	4.3	27	32	41	2	0.32
P3VU	510563	9536049	1.2×10^{-3}	1	Rápida	4.6	33	22	46	2	0.3
P4VS	503382	9535923	1.3×10^{-3}	1	Rápida	3.1	37	18	46	2	0.31
P4VU	507395	9531870	8.9×10^{-4}	2	Moderada a rápida	4.4	34	13	54	1	0.27
PGF1	494248	9523070	2.5×10^{-5}	6	Muito Lenta	1.6	24	48	27	2	0.62
PGF2	505250	9510488	1.4×10^{-3}	1	Rápida	1.2	32	55	11	2	0.48
PGF3	514341	9513516	6.7×10^{-4}	2	Moderada a rápida	1.7	33	44	23	2	0.46
PGF4	496431	9540075	5.3×10^{-7}	6	Muito Lenta	1.8	19	44	37	2	0.62
PGM5	509738	9518986	6.7×10^{-5}	4	Lenta a moderada	2.6	39	37	20	2	0.48
PGM6	515980	9524320	2.2×10^{-5}	6	Muito Lenta	3.4	45	27	26	2	0.4
PGT3	498147	9521028	1.1×10^{-6}	6	Muito Lenta	1.4	36	36	28	2	0.56
PGT6	494669	9511873	2.6×10^{-5}	6	Muito Lenta	2.1	29	29	41	2	0.5
PGT7	491388	9510703	1.0×10^{-6}	6	Muito Lenta	0.9	40	34	26	2	0.58
PGT8	489646	9511319	4.7×10^{-5}	5	Lenta	0.3	68	25	7	3	0.57
PGT10	505716	9524307	1.8×10^{-7}	5	Lenta	2.2	28	45	26	2	0.52

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura 59 – Mapa comparativo das erodibilidades



Fonte: Elaborado pelo Autor

7 ZONEAMENTO GEOTÉCNICO GERAL

Um dos processos fundamentais no mapeamento geotécnico é o trabalho de zoneamento, onde é feita a delimitação de unidades relacionadas diretamente aos tipos de atributos relacionados a um vetor de interesse, ou seja, a definição de unidades deve ser pertinentes e representem um determinado comportamento relativo aos objetivos do mapeamento (Zuquete e Gandolfi, 2004).

O mapa de zoneamento geotécnico geral fornecem informações simplificadas das condições geotécnicas, facilitando seu uso e aproveitamento para usuários leigos ou não-especialistas e “possibilita verificar as relações funcionais e espaciais dos atributos básicos que definem unidades homogêneas”. (Zuquete e Gandolfi, *op. cit.*).

As formas de delimitação ou classificação de unidades com heterogeneidade mínima podem ser feitas através de vários processos, como sobreposições, matrizes, álgebra de mapas, geoestatística, etc.

Neste mapeamento, na delimitação de zonas homogêneas, utilizou-se a técnica de sobreposição controlada, onde os documentos cartográficos básicos eram sobrepostos dois a dois, e após controle e avaliação dos resultados, nova sobreposição era feita.

Neste trabalho, elaborou-se uma sistematização hierárquica de zonas e sub-zonas geotécnicas, onde os documentos básicos utilizados na definição das zonas foram: declividade, topografia, substrato rochoso, lineamentos estruturais, pedologia e unidades de relevo.

No caso das sub-zonas, os Documentos Fundamentais Básicos utilizados no processo de delimitação das unidades, foram, além dos mencionados acima: o mapa de feições do terreno, e ainda, as cartas derivadas e interpretativas de erosividade e erodibilidade.

A classificação de riscos foi mapeada considerando os produtos citados em riscos Muito Alto, Alto, Médio, Baixo e Muito Baixo tendo como parâmetro a realidade local em termos de classes de erosividade e erodibilidade, a densidade de lineamentos estruturais em cada sub-zona e as características morfométricas intrínsecas nas feições do terreno.

Em alguns setores específicos (sub-zonas), há também riscos maiores de inundações. Nesse caso, foi feita uma breve consideração nas áreas mais suscetíveis a esse processo.

Foram delimitadas 9 (nove) zonas de mínima heterogeneidade representando as particularidades das condições geotécnicas de cada setor e considerando os atributos específicos dos documentos cartográficos básicos que influenciam nos processos geodinâmicos mais importantes na serra: a erosão (laminar e linear) e os movimentos de massa.

As zonas e sub-zonas geotécnicas do presente mapeamento são as seguintes:

- Zona 1: Área correspondente às colinas de cimeira em cotas superiores a 700 metros com declividades predominantes entre 15 e 30% em litologias paraderivadas da Unidade Independência e Argissolos Distróficos e Neossolos Flúvicos.

Sub-zonas:

➤ 1A – Alta erosividade, erodibilidade forte e muito fraca para os Argissolos e Neossolos, respectivamente. Predomínio de colinas de cimeira côncaco-convexa. Riscos associados - Baixa suscetibilidade a movimentos de massa e média suscetibilidade à erosão

➤ 1B – Média erosividade, forte erodibilidade e ocorrência de colinas de baixa incisão. Riscos associados – Muito baixa suscetibilidade a movimentos de massa e média suscetibilidade à erosão.

➤ 1C – Média erosividade, forte erodibilidade e colinas de cimeira côncaco-convexa. Riscos associados – Baixa suscetibilidade a movimentos de massa e média suscetibilidade à erosão.

➤ 1D – Alta erosividade, erodibilidade forte e muito fraca para os Argissolos e Neossolos, respectivamente. Colinas de cimeira côncaco-convexa, de baixa incisão e planícies alveolares. Riscos associados - Média suscetibilidade a movimentos de massa e à erosão.

➤ 1E – Alta erosividade, forte erodibilidade e colinas de cimeira côncaco-convexa com setores de colinas de forte incisão. Riscos associados - Média suscetibilidade a movimentos de massa e à erosão.

➤ 1F – Média erosividade, forte erodibilidade e colinas côncaco-convexa em cabeceira de drenagem. Riscos associados – Muito alta suscetibilidade à erosão (linear), média suscetibilidade a movimentos de massa.

➤ 1G – Alta erosividade, erobilidade forte e muito fraca para os Argissolos e Neossolos, respectivamente. Colinas de baixa incisão, terraços e planícies alveolares. Riscos associados – Média suscetibilidade à erosão, muito baixa suscetibilidade a movimentos de massa e média suscetibilidade à inundações e encharcamentos temporários.

- Zona 2: Vertente oriental com predomínio de declividades acima de 30% em relevo montanhoso e/ou em morros elaborados em rochas paraderivadas da Unidade Independência e Argissolos Eutróficos.

Sub-zonas:

➤ 2A – Média erosividade, erobilidade muito forte e vertentes de topos convexos e encostas côncavas. Riscos associados - Alta suscetibilidade a movimentos de massa e à erosão

➤ 2B – Média a alta erosividade, média erodibilidade. Vertentes de topos convexos com setores colinosos. Riscos associados - Média suscetibilidade a movimentos de massa e à erosão.

➤ 2C – Média erosividade e erodibilidade. Vertentes de topos convexos e encostas côncavas. Riscos associados - Média suscetibilidade a movimentos de massa e à erosão.

➤ 2D – Alta a média erosividade, média erodibilidade e vertentes de topos convexos com setores colinosos. Riscos

associados - Alta suscetibilidade a movimentos de massa, média suscetibilidade à erosão.

➤ 2E – Média erosividade, predominantemente média erodibilidade e vertentes de topos convexos com setores colinosos. Riscos associados - Média suscetibilidade a movimentos de massa, média suscetibilidade à erosão.

➤ 2F – Alta a média erosividade, média erodibilidade e vertentes de topos convexos com setores colinosos. Riscos associados - Média suscetibilidade a movimentos de massa, média suscetibilidade à erosão.

➤ 2G – Média erosividade e erodibilidade. Vertente de topo plano e encosta convexa. Riscos associados – Muito baixa suscetibilidade a movimentos de massa e média suscetibilidade à erosão.

➤ 2H - Média erosividade e erodibilidade e vertentes côncavas em cabeceira de drenagem. Riscos associados – Muito alta suscetibilidade à erosão (linear), média suscetibilidade a movimentos de massa.

➤ 2I - Média a alta erosividade, média erodibilidade e vertentes côncavas em alta declividade. Riscos associados – Alta suscetibilidade a movimentos de massa, média suscetibilidade à erosão.

- Zona 3: Colinas de sopé em baixas declividades com alguns *inselbergs* e manchas de depósitos cenozóicos (Formação Barreiras) sobre gnaisses, xistos, rochas calcárias e calcissilicáticas da Unidade Independência, além de restritas ocorrências de ortognaisses e associação pedológica de Argissolos Eutróifcos e Neossolos Quartzarênicos.

Sub-zonas:

➤ 3A – Média a baixa erosividade, média a fraca erodibilidade. Vertentes de interflúvios divergentes e fundos de vales convergentes ou planares. Riscos Associados – Muito

Baixa suscetibilidade à movimentos de massa e baixa suscetibilidade à erosão.

➤ 3B – Média a baixa erosividade, média a fraca erodibilidade. Vertentes de topos convexos e encostas côncavas de baixas altitudes. Riscos Associados – Média suscetibilidade à movimentos de massa, média suscetibilidade à erosão.

- Zona 4: Vertente Sul com predomínio de declividades acima de 45%, relevo bastante escarpado com litologia em rochas quartzíticas e xistos e associação pedológica de argissolos e neossolos litólicos.

Sub-zonas:

➤ 4A – Média a baixa erosividade, média erodibilidade e vertentes de topos convexos com encostas côncavas. Riscos Associados – Média suscetibilidade à movimentos de massa, média suscetibilidade à erosão.

➤ 4B – Média a alta erosividade, erodibilidade predominantemente forte e muito forte para Argissolos Distróficos e Neossolos Litólicos e vertentes de topos convexos com encostas côncavas com setores de colinas côncavo-convexas e de forte incisão e morros de cimeira sobre quartzitos. Riscos Associados – Alta suscetibilidade à movimentos de massa, alta suscetibilidade à erosão.

➤ 4C - Média a alta erosividade, muito forte erodibilidade e vertentes côncavas ou escarpas em cabeceira de drenagem. Riscos associados – Muito alta suscetibilidade à erosão (laminar e linear), alta suscetibilidade a movimentos de massa.

- Zona 5: Vertente oriental com declividades predominantemente acima de 30%, ocorrência de faixa quartzítica controlando escarpas em relevo montanhoso e de morros sob neossolos litólicos.

Sub-zonas:

➤ 5A – Média erosividade, muito forte erodibilidade e vertentes de topos convexos com encostas côncavas. Riscos associados – Muito alta suscetibilidade à erosão, alta suscetibilidade a movimentos de massa.

➤ 5B – Média erosividade, muito forte erodibilidade, vertentes de topos convexos com encostas côncavas e colinas de forte incisão em relevo escarado sobre rochas quartzíticas com foliação de médio a baixo ângulo. Riscos associados – Muito alta suscetibilidade à erosão e à movimentos de massa.

➤ 5C – Média a alta erosividade, muito forte erodibilidade, vertentes de topos convexos com encostas côncavas. Riscos associados – Muito alta suscetibilidade à erosão, alta suscetibilidade à movimentos de massa.

➤ 5D – Média erosividade, muito forte erodibilidade, vertentes de topos convexos com encostas côncavas e colinas de forte incisão em relevo escarado sobre rochas quartzíticas com foliação de médio a alto ângulo. Riscos associados – Muito alta suscetibilidade à erosão e à movimentos de massa.

➤ 5E – Alta erosividade, muito forte erodibilidade e vertentes de topos convexos com encostas côncavas. Riscos associados – Alta suscetibilidade a movimentos de massa, muito alta suscetibilidade à erosão.

➤ 5F – Média erosividade, muito forte erodibilidade e vertentes de topos convexos com encostas côncavas. Riscos associados – Média suscetibilidade a movimentos de massa, alta suscetibilidade à erosão.

➤ 5G – Baixa erosividade, muito forte erodibilidade e vertentes de topos convexos com encostas côncavas. Riscos associados – Média suscetibilidade a movimentos de massa e à erosão.

➤ 5H – Média a baixa erosividade, muito forte erodibilidade e vertentes de topos convexos com encostas côncavas. Riscos associados – Média suscetibilidade a movimentos de massa e à erosão.

➤ 5I – Baixa erosividade, muito forte e média erodibilidade para neossolos litólicos e luviissolos, respectivamente. Vertentes de topos convexos com encostas côncavas em baixas cotas topográficas. Riscos associados – Baixa suscetibilidade a movimentos de massa, média suscetibilidade à erosão.

➤ 5J – Média erosividade, muito forte erodibilidade e vertentes de topos convexos com encostas côncavas. Riscos associados – Média suscetibilidade a movimentos de massa, alta suscetibilidade à erosão.

➤ 5K – Média a alta erosividade, muito forte erodibilidade e vertentes côncavas ou escarpas em cabeceira de drenagem, algumas sobre rochas quartzíticas e controladas por estruturas planares. Riscos associados – Muito alta suscetibilidade à erosão (laminar e linear), muito alta suscetibilidade a movimentos de massa.

- Zona 6: Zona de grande amplitude clinográfica, com ocorrência de montanhas, morros, morros suaves e morrotes em área de contato litológico entre os migmatitos do Complexo Tamboril Santa-Quitéria e as rochas paraderivadas da Unidade Independência sob Argissolos Eutróficos. Grande presença de estruturas planares.

Sub-zonas:

➤ 6A – Média erosividade, média erodibilidade e vertentes de topos convexos com encostas côncavas em relevo montanhoso com setores de alta declividade sobre xistos e lentes quartzíticas com foliação de média a alto ângulo. Riscos associados – Muito alta suscetibilidade a movimentos de massa, média suscetibilidade à erosão.

➤ 6B – Média erosividade, média erodibilidade e vertentes de topos convexos com encostas côncavas em relevo de morros suaves sobre rochas ortognaisses e migmatitos de alto ângulo e vales fechados controlados por densa rede de estruturas planares. Riscos associados – Média suscetibilidade

a movimentos de massa, à erosão e à inundações temporárias nos setores mais planos dos vales fechados.

➤ 6C – Média erosividade, média erodibilidade e vertentes de topos convexos com encostas côncavas, algumas de alta declividade, em relevo montanhoso. Riscos associados – Alta suscetibilidade a movimentos de massa, média suscetibilidade à erosão.

➤ 6D – Média erosividade, média erodibilidade e vertentes de topos convexos com encostas côncavas em relevo montanhoso marcado por forte controle estrutural. Riscos associados – Alta suscetibilidade a movimentos de massa, média suscetibilidade à erosão.

- Zona 7: Predomínio de baixas declividades em áres de relevo em morros suaves e vertente em relevo montanhoso modeladas em rochas paraderivadas sob Planossolos e Neossolos Litólicos.

Sub-zonas;

➤ 7A – Média a baixa erosividade, muito forte e média erodibilidade para Planossolos e Neossolos Litólicos, respectivamente. Vertentes de topos convexos com encostas côncavas com predomínio de declividades médias (abaixo de 30%). Riscos associados – Média suscetibilidade a movimentos de massa e à erosão laminar.

➤ 7B – Média a baixa erosividade, muito forte erodibilidade e vertentes de topos convexos com encostas côncavas com declividades acima de 30%. Riscos associados – Média suscetibilidade a movimentos de massa e alta suscetibilidade à erosão laminar.

- Zona 8: Setor de declividades médias a altas em cotas altimétricas superiores a 700 metros em Argissolos e fortemente estruturada por lineamentos planares, tanto rúpteis quanto dúcteis, em zona de contato litológico entre o Complexo Tamboril Santa-Quitéria e

a Unidade Independência, além de ocorrências de granitos próximo às zonas de cisalhamento.

Sub-zonas:

➤ 8A – Média erosividade e média erodibilidade.

Fundo de vale estruturado em zona de cisalhamento transcorrente dextral com vertentes côncavas e abruptas moldadas em migmatitos de foliação de alto ângulo e ocorrência de vales perpendiculares de forte controle rúptil. Riscos associados – Muito alta suscetibilidade a movimentos de massa e média suscetibilidade à erosão laminar.

➤ 8B – Alta erosividade, forte erodibilidade e colinas de cimeira côncaco-convexa com setores de colinas de forte incisão com declividades acima de 45% e forte controle estrutural dos vales em falhas e fraturas L-W. Riscos associados – Alta suscetibilidade a movimentos de massa e à erosão laminar.

➤ 8C – Média erosividade, média a forte erodibilidade para Argissolos Distróficos e Argissolos Eutróficos, respectivamente. Presença de vertentes de topos convexos com encostas côncavas em declividades acima de 30%, colinas de cimeira côncaco-convexa com setores de colinas de forte incisão com declividades acima de 45% e forte controle estrutural dos vales perpendiculares em falhas e fraturas L-W e N-S entre zona de cisalhamento transcorrente e compressional. Riscos associados – Alta suscetibilidade a movimentos de massa e média suscetibilidade à erosão laminar.

➤ 8D – Alta erosividade, forte erodibilidade e colinas de cimeira côncaco-convexa com vertentes de declividade acima de 30% e vales estruturados em fraturas L-W e NE-SW entre zonas de contato entre o Complexo Tamboril Santa-Quiteria e a Unidade Independência e zonas de cisalhamento compressionais. Riscos associados – Média suscetibilidade a movimentos de massa e alta suscetibilidade à erosão laminar.

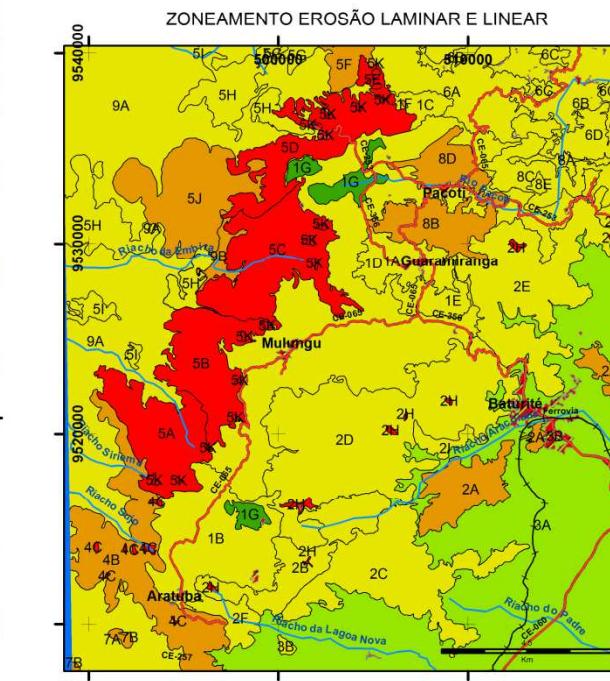
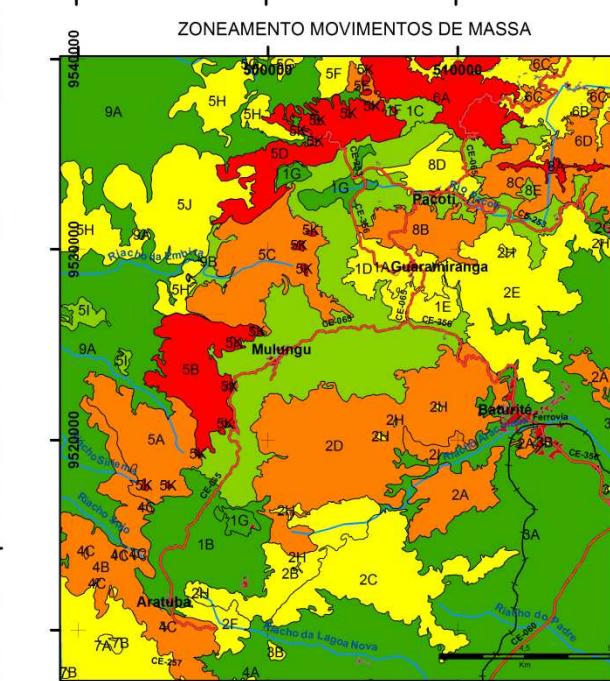
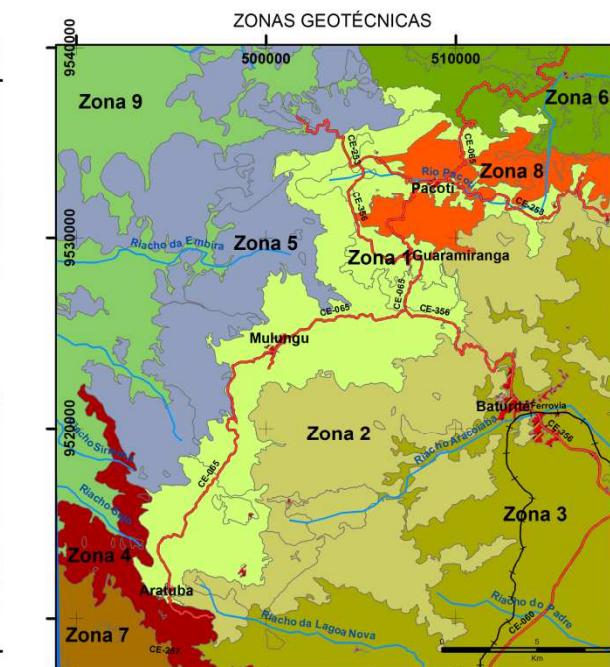
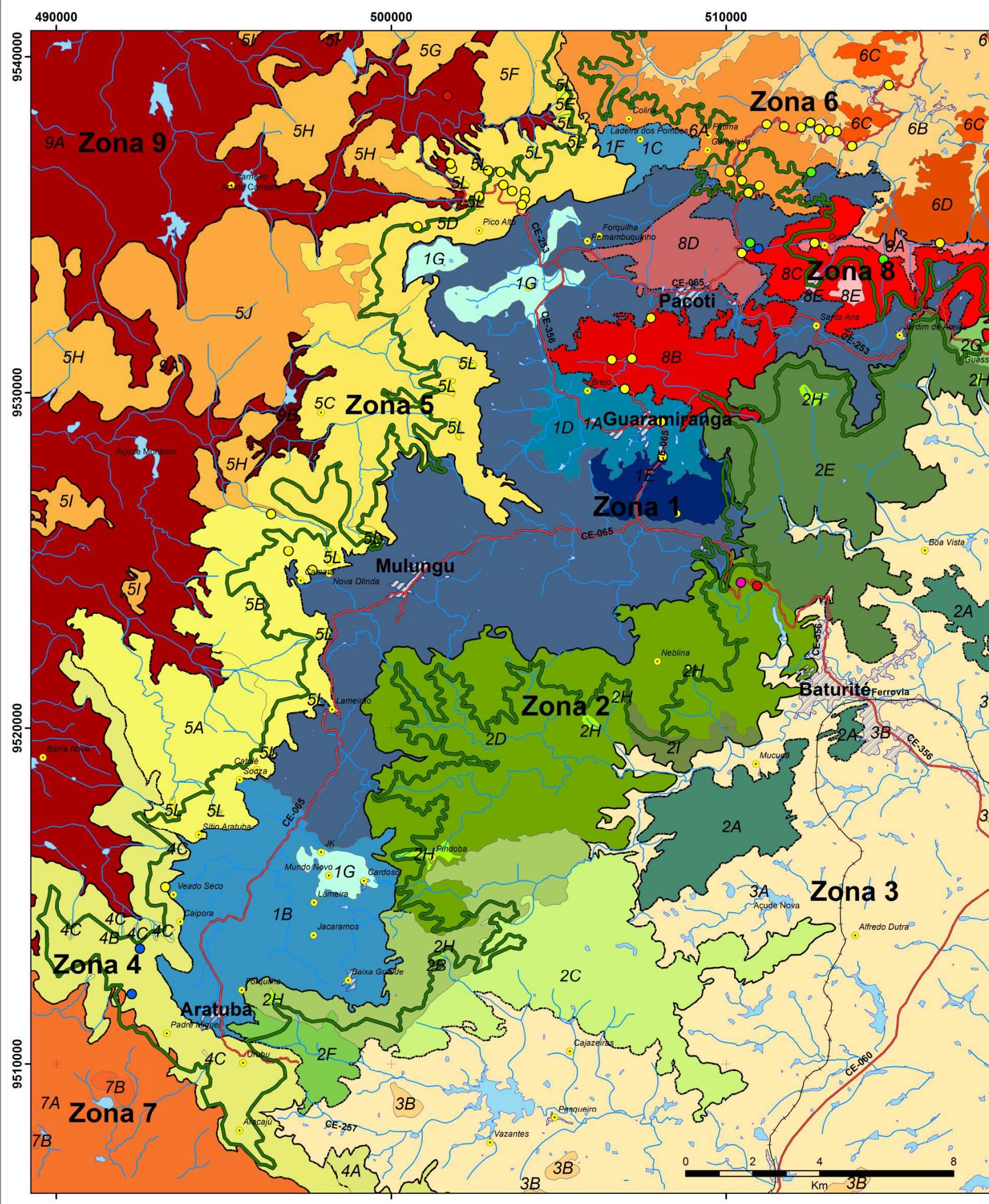
➤ 8E – Média erosividade, forte erodibilidade. Topo planar de colina de cimeira em declividades abaixo de 30%. Riscos associados – Baixa suscetibilidade a movimentos de massa e média suscetibilidade à erosão laminar.

- Zona 9: Área de cotas altimétricas inferiores a 250 metros e de baixas declividades (< 15%) em colinas e morros suaves em rochas paraderivadas com pouca estruturação rúptil e pedologia de Luvissolos.

Sub-zonas:

➤ 9A – Baixa erosividade, média erodibilidade. Vertentes de interflúvios divergentes e fundos de vales convergentes ou planares e setores de vertentes de topos convexos com encostas côncavas em declividades abaixo de 15%. Riscos Associados – Muito baixa suscetibilidade à movimentos de massa e média suscetibilidade à erosão laminar.

➤ 9B – Média erosividade, forte erodibilidade e vertentes côncavas em declividades abaixo de 30%. Riscos Associados – Baixa suscetibilidade à movimentos de massa e alta suscetibilidade à erosão laminar.



ZONEAMENTO GEOTÉCNICO GERAL

UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
Centro de Ciências
Departamento de Geologia
Programa de Pós-Graduação em Geologia
GEOPROCESSAMENTO APLICADO AO
MAPEAMENTO GEOTÉCNICO EM
ESCALA REGIONAL - O CASO DA
SERRA DE BATURITÉ/CE
Cleistene Teixeira Batista
Orientador: César Ulisses Vieira Veríssimo

Legenda

Processos Naturais

Tipos

- Deslizamento Rotacional
 - Deslizamento Translacional
 - Queda de Blocos
 - Queda de Blocos e Deslizamento
 - Queda de Blocos e Fluxo de Lama
- APA da Serra de Baturité
- Localidades
- Rodovia pavimentada
- Ferrovia
- Áreas Urbanas
- Açudes e Lagoas
- Drenagens
- Zonas e Sub-zonas Geotécnicas

Riscos-Subzonas

Movimentos de Massa

- Muito Alto
- Alto
- Médio
- Baixo
- Muito Baixo

Riscos-Subzonas

Riscos Erosão

- Muito Alto
- Alto
- Médio
- Baixo
- Muito Baixo

Escala Gráfica

0 10 20 Km

UTM24S / WGS84

Fontes:
Imagem Landsat 5 217/63 de 24/07/2004 -
Composição RGB Bandas 7, 4, 2
Imagem Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) r
e amostradas pelo projeto TOPODATA/INPE

8 CONCLUSÕES

O presente mapeamento geotécnico na região da Serra de Baturité permitiu estabelecer uma série de constatações e comprovações de hipóteses em termos da aplicabilidade dos recursos de geoprocessamento para fins geotécnicos, bem como da necessidade da complementação dos trabalhos de campo na aferição dos dados, mesmo em escala regional.

O uso de ferramentas de geoprocessamento e o processamento digital de imagens de satélite atenderam a contento a tarefa de gerar dados primários a serem utilizados num mapeamento geotécnico de caráter orientativo.

Informações importantes para o zoneamento geotécnico, como a densidade de lineamentos estruturais foi resultado do tratamento de sensores ópticos e de radar e o Mapa de Feições do Terreno foi construído com os dados de declividade e curvatura das vertentes obtidas pelo TOPODATA. Salienta-se que toda a base de dados utilizados no geoprocessamento foi obtida gratuitamente na web.

No entanto, foi indispensável o levantamento de campo para a apuração dos dados obtidos em gabinete, seja nos dados de foliação e estruturas lineares, que foram usados principalmente nos estudos de movimentos de massa, como nas coletas de solo, utilizadas para estabelecer o comparativo dos solos da região com os valores de erodibilidade já obtidos em outros para as mesmas classes de solo.

O Mapa de Riscos ao Sistema Viário não poderia ser elaborado sem os dados de mergulho e direção das foliações, cujo levantamento se deu nas principais vias da região. O levantamento estrutural ainda permitiu compreender que a densa rede de lineamentos E-W no nordeste na região está associada a um conjunto de zonas de cisalhamento, possivelmente formando um modelo de Riedel, que estrutura todo o sistema hidrográfico da região e é responsável pela alta dissecação do relevo naquele setor.

Essa área, especificamente, demanda estudos estruturais mais aprofundados, mas com o que foi levantado, pode-se afirmar que as zonas de maior ocorrência de movimentos de massa em litologias diferentes do xisto se encontram justamente no setor nordeste da serra, onde há a maior densidade de lineamentos estruturais por km².

Apesar de ser a declividade o principal fator na promoção dos movimentos de massa, a ocorrência de xistos está diretamente associada ao aumento de risco para a sua deflagração, principalmente na vertente ocidental da serra. Esse fator, associado à declividade e a densidade de juntas e fraturas competem para o aumento de riscos de movimentos de massa. Nesse caso, o setor noroeste da serra é o que apresenta maior risco para esse tipo de processo.

Todos os levantamentos de erodibilidade apontaram que a vertente ocidental apresenta as maiores taxas de erodibilidade, enquanto a maior erosividade se concentra na zona de cimeira, em especial no setor nordeste da área de estudo.

Com base nesses dados, é seguro afirmar que o setor mais suscetível do ponto de vista geotécnico na região de estudo, é a vertente noroeste da serra de Baturité. Nessa área, a rodovia CE-228 cortada em xistos e quartzitos foliados em direção à estrada em trechos com declividade acima de 30% apresenta setores com taludes denotando instabilidade e risco de queda de blocos e deslizamentos.

A metodologia de cartografia geotécnica utilizada, baseada na Escola de Engenharia de São Carlos (USP), mostrou-se bastante eficaz e didática na forma de disposição e hierarquia dos documentos cartográficos, porém, no uso do Mapa de Zoneamento Geotécnico Geral, um Documento Fundamental Básico, o uso de cartas de erosividade e erodibilidade, que são documentos Derivados e Interpretativos, foi fundamental na caracterização das zonas geotécnicas.

Ou seja, neste trabalho, a elaboração do Mapa de Zoneamento Geotécnico Geral não utilizou apenas os Documentos Fundamentais Básicos, pois havia informações essenciais em outras hierarquias de mapeamento que foram usadas para estabelecer as zonas geotécnicas com mais rigor e qualidade.

Os mapas de Zoneamento Geotécnico Geral, Suscetibilidade a Movimentos de Massa e Riscos ao Sistema Viário são os produtos conclusivos deste trabalho, uma vez que estabelecem zonas e setores de maior ou menor risco geotécnico numa linguagem cartográfica clara que podem ser usados por não-especialistas, incluindo gestores públicos.

Esses mapas delimitam as zonas onde a abertura de rodovias implicaria em maior risco e os trechos das estradas mais suscetíveis a movimentos de massa, o que permite gerenciar a tomada de decisões e a alocação de recursos no aumento da segurança viária e geotécnica da região.

9 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, F. F. M. de; HASUI, Y. BRITO NEVES, B. B. de FUCK, R. A. **Províncias Estruturais Brasileiras.** In: SBG, Simpósio de Geologia do Nordeste, 8, Campina Grande. Boletim Resumos, 6: 363 – 391. 1977.

ALMEIDA, G. B. **Modelagem da Retenção de Sedimentos em Reservatório no Semi-Árido.** Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Civil – UFC, Área de Concentração: Recursos Hídricos. Fortaleza, 2001.

ALVES, L. E. F. **Investigação dos Condicionantes Geológico-Geotécnicos de Estabilidade de Taludes entre os Quilômetros 46 e 64,3 da Rodovia CE-065 em Palmácia-CE.** Relatório de Graduação. Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências, Depto. de Geologia, Fortaleza, 2012.

AMORIM, H. R. **Mapeamento Geotécnico dos Municípios de Guaramiranga e Pacoti.** Relatório de Graduação. Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências, Depto. de Geologia, Fortaleza, 2000.

ARTHAUD, M. H. **Evolução Neoproterozóica do Grupo Ceará (Domínio Ceará Central, NE, Brasil): da Sedimentação à Colisão Continental Brasiliiana.** Tese de Doutorado. Universidade de Brasília. Instituto de Geociências. Brasília: 2007.

ARTHAUD, M. H., VASCONCELOS, A.M., OLIVEIRA, F.V.C., **As seqüências metassedimentares do Ceará Central.** 40. Congresso Brasileiro de Geologia, Belo Horizonte, 16. 1998.

AUGUSTO FILHO, O. CERRI, L.E.S. AMENOMORI, C.J. **Riscos Geológicos: aspectos conceituais.** In: SIMPÓSIO LATINO-AMERICANO SOBRE RISCO GEOLOGICO URBANO, 1, 1990, São Paulo. Anais. São Paulo: ABGE. 1990. p. 334-341.

AUGUSTO FILHO, O. 1992. **Caracterização geológico-geotécnica voltada a estabilização de encostas: uma proposta metodológica.** In: CONFERENCIA

BRASILEIRA SOBRE ESTABILIDADE DE ENCOSTAS, 1, 1992, Rio de Janeiro. Anais. Rio de Janeiro: ABMS/ABGE. p. 721-733.

BAPTISTA, G. M. DE M. **Diagnóstico ambiental de erosão laminar: modelo geotecnológico e aplicação.** Brasília: Universa, 2003.

BARBOSA, W. R. **Evolução pedogenética em duas vertentes do Maciço de Baturité-CE.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Ceará. Centro de Ciências Agrárias. Depto. De Solos, Fortaleza, 2008.

BASTOS, F. H. **Classificação dos Movimentos de Massa no Maciço de Baturité (CE) e Contribuições para Estratégias de Planejamento Ambiental.** Tese de Doutorado. Universidade Federal do Ceará. Centro de Ciências. Pós-Graduação em Geografia. Fortaleza: 2012.

BATISTA, C. T. **A Mineração de Agregados na Região Metropolitana de Fortaleza: Impactos Ambientais e Conflitos de Uso e Ocupação do Solo.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Ceará. Centro de Ciências. Programa de Pós-Graduação em Geologia. Fortaleza: 2010.

BERTONI, J. & LOMBARDI NETO, F. **Conservação do Solo.** Livroceres: Piracicaba. 1985.

BERTONI, J. & LOMBARDI NETO, F. **Conservação do Solo.** Ícone: São Paulo. 1993.

BÉTARD, F. **Spatial variations of soil weathering processes in a tropical mountain environment: the Baturité massif and its piedmont (Ceará, NE Brazil).** In: Catena. 2012. Vol. 93. 18 - 28.

BÉTARD, F., PEULVAST, J. P., SALES, V.C. **Caracterização Morfopedológica de uma Serra Úmida no Semi-árido do Nordeste Brasileiro: O caso do Maciço de Baturité-CE.** Revista de Geografia da UFC, ano 05, n 12. p 107-126. UFC. Fortaleza: 2007.

BRAGA, A. de P. G.; PASSOS, C. A. B.; SOUZA, E. M.de ; FRANÇA, J. B.de; MEDEIROS, M. de F.; ANDRADE, V. A. **Projeto Fortaleza; Relatório Final.** Recife, DNPM/CPRM. 10v. II.1977.

BRANDAO, R.L. Sistema de Informação para Gestão e Administração Territorial da Região Metropolitana de Fortaleza - Projeto Sinfor. **Mapa Geológico da Região Metropolitana de Fortaleza – Texto Explicativo**, CPRM, Fortaleza, 1995.

BIZZI, L. A.; SCHOBENHAUS, C.; GONÇALVES, J. H.; BEARS, F. J.; DELGADO, I. M.; ABRAM, M. B.; LEÃO NETO, R.; MATOS, R. M.M.; SANTOS, J. O. S. (coords). **Geologia Tectônica e Recursos Minerais do Brasil: Sistema de Informações Geográficas.** Escala 1: 2.500.000. CPRM, Brasília, 4 CD-ROM.2001.

BONHAM-CARTER, G. F. **Geographic information systems for geoscientists, modeling with GIS.** Ontario: Pergamon, 1994.

BRITO NEVES, B.B. **Regionalização geotectônica do pré-cambriano nordestino.** Tese de doutorado apresentada ao IG/USP. Mimeografado. 198 p. 1975.

BRITO NEVES, B.B. **América do Sul: Quatro Fusões, Quatro Fisões e o Processo Acrescionário Andino.** In: Revista Brasileira de Geociências. 29(3):379-392. São Paulo, 1999.

BRITO NEVES, B. B.; SANTOS, E.J.; VAN SCHMUS, W.R. **Tectonic history of the Borborema Province, Northeastern Brazil.** In: Tectonic evolution of South America. 31st International Geological Congress. August 6-17, Rio de Janeiro, 2000.

BURROUGH, P.A. **Principles of geographical information systems for land resources assessment.** Oxford: Claredon Press, 3^o ed, 1991.

CABY, R.; SIAL, A. N.; ARTHAUD, M. H. AND VAUCHEZ, A. 1991. **Crustal Evolution and Brasiliano Orogeny in Northeast Brazil, pp. 373-397.** In:Dallmeyer,

R. D. & Lécorcché, J. P., *The West African Orogens and Circum-Atlantic Correlatives*. Springer-Verlag, 1991.

CÂMARA, G., DAVIS, C. MONTEIRO, A.M.V. **Introdução à Ciência da Geoinformação**. São José dos Campos: INPE, 2001. Acesso em: 10 de junho de 2012. Disponível em: <http://mtc-m12.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/sergio/2004/04.22.07.43/doc/publicacao.pdf>

CARVALHO, N. O. **Hidrossedimentologia Prática**. CPRM. 143p. Rio de Janeiro. 1994.

CARVALHO, C. M de. **Avaliação da suscetibilidade aos movimentos de massa nos entornos dos polidutos de Cubatão (SP), com o apoio de técnicas de geoprocessamento**. Monografia de Conclusão de Curso. IGCE – UNESP, Rio Claro, 2003.

CARVALHO, M. J. DE. **Estruturação do grupo Serra Grande na Região de Santana do Acaraú (CE) e a Reativação do Lineamento Sobral – Pedro II: Integração com Dados Geofísicos**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Norte – UFRN, Programa de Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica, Natal, 2003.

CARVALHO, M. P.; FREDII, O. S.; VERONESE, V. **Critérios de classificação de chuva individual erosiva para o Estado de São Paulo**. Acta Scientiarum, v.26, p.175-183, 2004.

CASSETI, V. **Geomorfologia**. [S.I.]:[2005]. Disponível em: <http://www.funape.org.br/geomorfologia/>. Acesso em: 26 de setembro de 2011.

CASTRO, A. L. C. de. **Glossário de Defesa Civil: Estudos de riscos e medicina de desastres**. 2 ed. Brasília: Ministério do Planejamento e Orçamento/Departamento de Defesa Civil, 1998, 173p.

CAVALCANTE, J. C.; VASCONCELOS, A. M.; GOMES, F. E. M.; 2003. **Mapa Geológico do Estado de Ceará.** In: Atlas digital de Geologia e recursos mineiros do Ceará. Geologia, Recursos Minerais, Geoquímica, Geofísica, Geomorfologia, Sistema de Informações Geográficas – SIG. Mapas na escala 1: 500.000. MME-CPRM. Edição 2003.

CERRI, L. E. da S. **Riscos Geológicos associados a escorregamentos: uma proposta para prevenção de acidentes.** 1993. 197p. Tese (Doutorado em Geociências) - Universidade Estadual de São Paulo, Rio Claro, 1993.

CERRI, L. E. da S. & AMARAL, C. P. do. Riscos Geológicos. In: OLIVEIRA, A. M. dos S. & BRITO, S. N. A. de. (org). **Geologia de Engenharia.** São Paulo: ABGECNPq-FAPESP, 1998. p. 131-144.

DA COSTA, C. N. Notas de Aula: **Fundamentos de Geotecnia.** Disponível em: http://www.dec.fct.unl.pt/seccoes/S_Geotecnia/Fundamentos_Geotecnia/2_introducao.pdf. Acesso em: 10 de setembro de 2011.

CHAVES, J. M., SANO, E. E., EDI, M. G., SILVA, A. B., MENESSES, P. R. **Sinergismo entre dados ópticos e de radar no estudo geológico da região de bezerra-cabeceiras, Goiás.** Revista Brasileira de Geociências. 33 (2-Suplemento):137-146, 2003. Disponível em: http://sbgeo.org.br/pub_sbg/rbg/vol33_down/3302suplemento/sr-18.pdf. Acesso em: 28 de novembro de 2011.

CHORLEY, R. J. *et al.* **Geomorphology.** London: Methuen & CO. Ltd. 1984.

COTTAS, L. R. **Estudos Geológico-Geotécnicos aplicados ao Planejamento Urbano de Rio Claro – SP.** 1983. 171f. Tese (Doutorado em Geociências) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 1983.

CPRM. Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais. **Programa de Recenseamento de Fontes de Abastecimento por Água Subterrânea no Estado do Ceará.** Fortaleza: 1998.

_____. Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais. **Mapa Geológico do Estado do Ceará**. Escala 1:500.000, Fortaleza, 2003.

_____. Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais. **Mapa Geológico da Folha SB.24 – X-A-I Baturité**. Escala 1:100.000, Fortaleza, 2012.

CROSTA, A. P. **Processamento Digital de Imagens de Sensoriamento Remoto**. Ed. rev. Campinas, SP: IG/UNICAMP, 170p, 1992.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Mapa Exploratório-Reconhecimento de Solos do Estado do Ceará**. Escala 1:600.00. Brasília, 1973

DA SILVA, A. F. M. **Análise da Suscetibilidade a Erosão dos Solos na Microrregião do Riacho dos Barros, Município de Aratuba – Ceará**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências, Depto. de Geologia, Fortaleza, 2007.

FARINASSO, M., JÚNIOR, O. A. C., GUIMARÃES, R. F., GOMES, R. A. T., RAMOS, V. M. **Avaliação Qualitativa do Potencial de Erosão Laminar em grandes áreas por meio da EUPS – Equação Universal de Perdas de Solos utilizando novas metodologias em SIG para os cálculos dos seus fatores na região do Alto Parnaíba – PI-MA**. Revista Brasileira de Geomorfologia – Ano 7, nº2. págs 73-85. 2006.

FRANCO, G. B., MARQUES, E. A. G., CALIJURI, M. L., GOMES, R. L. **Cartografia Geotécnica: Estágio atual do conhecimento**. Caminhos da Geografia – Revista online. Universidade Federal de Uberlândia - Instituto de Geografia - ISSN 1678-6343. V. 11, nº. 35. P. 158-172. Uberlândia, Set/2010. Disponível em: <<http://www.ig.ufu.br/revista/caminhos.html>>. Acesso em: 15 de novembro de 2011.

FERNANDES, N.F, DO AMARAL, C. P. Movimentos de massa: Uma abordagem geológico-geomorfológica. In: GUERRA, A. J. T., CUNHA, S. B. **Geomorfologia e Meio Ambiente**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2010.

FETTER, A.H., **U-Pb and Sm-Ndgeochronological constraints on the crustal framework and geologic history of Ceará State, NW Borborema Province, NE Brazil: implications for the assembly of Gondwana.** PhD thesis, Department of Geology, Kansas University, Lawrence, KS – USA, 164 pp. 1999.

FETTER, A. H.; DOS SANTOS, T. J. S.; VAN SCHMUS, W. R.; ARTHAUD, M. H.; NOGUEIRA NETO, J. A. **U/Pb and Sm/NdGeochronological Constraintson the Crustal Evolution and Basement Architecture of Ceará State, NWBorborema Province, NE Brazil: Implications for the Existence of thePaleoproterozoic Supercontinent “Atlântida”.** In: Revista Brasileira deGeociências 30 (1), 2000.

FILHO, M. R. F., SILVA, E. V. **Análise evolutiva da paisagem como subsídio para elaboração do zoneamento ambiental do município de Guaramiranga-CE.** Anais XV Simpósio de Sensoriamento Remoto – SBSR, Curitiba, PR, Brasil. p. 3734. INPE, 2011.

FLORENZANO. T. G. (org.) **Geomorfologia: conceitos e tecnologias atuais.** São Paulo: Oficina de textos, 2008.

GARZELLA, T.C. **Automação da leitura do medidor Speedy e utlização em programa de manejo de irrigação.** Disponível em:
<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/11/11143/tde-02052011-093404/pt-br.php>.
Acesso em: 27 de novembro de 2011.

GERSCOVICH, D. M. S. **Estabilidade de Taludes.** Disponível em:
<http://www.eng.uerj.br/~denise/pdf/estabilidade.pdf> Acesso em: 23 de setembro de 2011.

GROHMANN, C.H.; RICCOMINI, C.; STEINER, S.S. **Aplicações dos modelos de elevação SRTM em geomorfologia.** Rev. Geográfica Acadêmica v.2 n.2 (viii.2008) 73- 83. Disponível em:
<http://www.rga.ggf.br/index.php?journal=rga&page=article&op=viewFile&path%5B%5D=33&path%5B%5D=31>. Acesso em: 29 de novembro de 2011.

GUERRA. A. J. T. Encostas Urbanas. In: GUERRA, A. J. T. (org.) **Geomorfologia Urbana**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2011.

GUIDICINI, G., IWASA, O.Y. **Ensaio de correlação entre pluviosidade e escorregamentos em meio tropical úmido**. São Paulo. IPT, 1976.

GUIDICINI, G., NIEBLE, C. M. **Estabilidade de taludes naturais e de Escavação**. 2º Edição. São Paulo. EdgardBlücher, 1984, 194p.

HAAN, C. T.; BARFIELD, B. J. & HAYES, J. C. **Design Hydrology and Sedimentology for Small Catchments**. In: Erosion and Sediment Yield. Cap.8. Academic Press. Inc. San Diego, CA. 260p. 1994.

HIJMANS, R. J., CAMERON, S. E., PARRA, J. L., JONES, P. G., JARVIS, A. **Very high resolution interpolated climate surfaces for Global land areas**. Int. J. Climatol. 25: 1965–1978 (2005). Disponível em: http://www.worldclim.org/worldclim_IJC.pdf. Acesso em: 28 de novembro de 2011.

INFANTI JUNIOR, N. & FORNASARI FILHO, N. Processos de Dinâmica Superficial. In: OLIVEIRA, A.M.S. & BRITO, S.N.A. (Eds.). **Geologia de Engenharia**. São Paulo: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia (ABGE), 1998. cap. 9, p.131-152.

INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS - IBAMA. **Planejamento Biorregional do Maciço de Baturité**. Universidade Estadual do Ceará, Fortaleza: 2002.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **Manual Técnico de Geomorfologia**. Coordenação de Recursos Naturais e Estudos Ambientais, Rio de Janeiro: 2009. 2ª edição.

_____. **Mapa de Unidades de Relevo do Brasil**. Coordenação de Recursos Naturais e Estudos Ambientais. Escala 1:5.000.000 Rio de Janeiro, 2006. 2ª edição.

INSTITUTO DE PESQUISA E ESTRATÉGIA ECONÔMICA DO CEARÁ - IPECE. **Perfil Básico Regional 2011 – Macrorregião de Baturité.** Disponível em: < http://www2.ipece.ce.gov.br/estatistica/perfilRegional/Perfil_Regional_R6_Baturite.pdf >. Acesso em: 05 de agosto de 2012.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO - IPT. **Mapa Geomorfológico do Estado de São Paulo.** São Paulo. 1981, 94p

_____. **Elaboração de subsídios técnicos para um plano de emergência para a área de Cubatão,** Estado de São Paulo. São Paulo. 1985 (IPT, Relatório nº 22.797).

_____. **Mapeamento de Riscos em Encostas e Margem de Rios /** Celso Santos Carvalho, Eduardo Soares de Macedo e Agostinho Tadashi Ogura, organizadores – Brasília: Ministério das Cidades, 2007

JARDIM DE SA, E.F. **A Faixa Seridó (Província Borborema, NE do Brasil) e o seu significado geodinâmico na Cadeia Brasiliiana/PanAfricana.** Brasília. 804 p. (Tese de Doutorado, Instituto de Geociências da Universidade de Brasília), 1994.

KLEIN, M. A. **Integração de Imagens TM e Aerogeofísicas para Análises Lito-Estruturais de uma Porção da Zona de Cisalhamento Transcorrente Dorsal de Cangunçu, Região de Quitéria - Várzea do Capivarita, RS..** 133 p. Dissertação de Mestrado. Centro Estadual de Pesquisas em Sensoriamento Remoto e Meteorologia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre; 1998.

KUX, H.J.H, ARAUJO, E.H.G., DUPONT, H.S.J.B. **Imagens de alta resolução do satélite QuickBird e técnicas de SIG para análises de problemas geológico-geotécnicos em áreas urbanas: estudo de caso belo Horizonte (MG).** Anais XIII Simpósio de Sensoriamento Remoto, Florianópolis, Brasil, 21-26 abril 2007, INPE, págs. 573-580.

LEMES. M. R. T. **Revisão dos Efeitos da Vegetação em Taludes.** Dissertação. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre: 2001.

LEMOS, R.C.; SANTOS, R.D. **Manual de descrição e coleta de solo no campo.** 2.ed. Campinas: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo; Embrapa-SNLCS, 1984. 46p.

LIRA, I. F. & DOS SANTOS, J .L. L. **Cartografia Geotécnica e Avaliação dos Efeitos dos Microbarramentos na Agricultura de Subsistência na Bacia do Rio Pesqueiro, Capistarno, CE.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências, Depto. de Geologia, Fortaleza, 2006.

MATOS, R.M.D. **The Northeast Brazilian Rift System.** *Tectonics* 11(4):766-791, 1992.

MEDEIROS, V. C. **Evolução Geodinâmica e Condicionamento Estrutural dos Terrenos Piancó-Alto Brígida e Alto Pajeú, Domínio da Zona Transversal, NE do Brasil.** Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Norte – UFRN, Programa de Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica, Natal, 2004.

MINEIRO, A. **Mecânica dos Solos e Fundações.** Vol. 1 Introdução. 99 p. FCT/UNL, 1981

MIRANDA, A. N. DE. Notas de Aula: **Introdução à Engenharia Geotécnica.** Centro de Tecnologia. Depto. de Eng. Hidráulica e Ambiental. Mestrado em geotécnica. UFC, Fortaleza, 2011.

MIRANDA, J. G. **Mapeamento geotécnico e estudo da suscetibilidade à erosão na bacia do Ribeirão Ponte de Pedra (MT), escala: 1:100.000.** 278 p. Tese de Doutorado. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos; 2005.

MORAES, E. C. **Fundamentos de Sensoriamento Remoto.** Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). São José dos Campos, 2002.

MOTA, F. K. S., OLIVEIRA, J. M. P. **Cartografia Geotécnica dos condicionantes de erosão e estabilidade de encostas no município de Pacoti – CE.** Relatório de Graduação. Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências, Depto. de Geologia, Fortaleza, 2011.

NOVO, E. M. L. de M. **Sensoriamento Remoto: Princípios e Aplicações.** 2 ed. São Paulo: Edgar Blucher, 1995.

OLIVEIRA, M. C. **Construção de uma carta para determinação de orientação das vertentes.** Revista IG, São Paulo, 5(1/2):47:50, jan/dez. 1984

OLIVEIRA, R.G. **Arcabouço Geofísico, Isostasia e Causas do Magmatismo Cenozóico da Província Borborema e de sua margem continental (Nordeste do Brasil).** Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Norte – UFRN, Programa de Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica, Natal, 2008.

PAES, K. A. D. **Análise da Vulnerabilidade à Erosão na bacia Hidrográfica do Rio Pacoti (Serra de Baturité).** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências, Depto. de Geologia, Fortaleza, 2004.

PEULVAST, J. P.; SALES, V. C. **Dispositivos morfo-estruturais e evolução morfotectônica da margem passiva transformante do Nordeste brasileiro.** Campinas. III Simpósio Nacional de Geomorfologia, 2000, 3 p.

PINÉO, T. R. G. **Integração de dados Geofísicos, Geológicos e de sensores remotos aplicados à prospecção de água subterrânea em meio fissural (Distrito de Juá, Irauçuba/CE).** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências, Depto. de Geologia, Fortaleza, 2005.

PRANDINI, F.L.; NAKAZAWA, V.A.; FREITAS, C.G.L. & DINIZ, N.C. **Cartografia geotécnica nos planos diretores regionais e municipais.** In: BITAR, O.Y. (Coord.). Curso de geologia aplicada ao meio ambiente. Associação Brasileira de Geologia de Engenharia (ABGE) e Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT), cap. 4.4, p.187-202, São Paulo: 1995.

PROIN/CAPES e UNESP/IGCE. Material Didático: arquivos de transparências (CD). Rio Claro: Departamento de Geologia Aplicada, 1999. Disponível em: <<http://www.rc.unesp.br/igce/aplicada/ead/cartas/carta01a.html>> Acesso em: 07 de outubro de 2011.

POLIVANOV, H., BARROSO, E. M. Geotecnia Urbana. In: GUERRA, A. J. T. (org.) **Geomorfologia Urbana**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2011.

RIBEIRO, S.C., de SOUZA, A.B., BESERRA, T.M.A.C. **A utilização da concepção geossistêmica em estudos ambientais de serras úmidas do nordeste brasileiro: o caso do Maciço de Baturité**. Cadernos de Cultura e Ciência. Universidade Regional do Cariri-URCA. Vol. 2 – Nº 2, Crato: 2007.

ROCHA, M. **Mecânica das Rochas**, 446 p. LNEC, Lisboa, 1981.

RODRIGUES, M. **Anais da quarta conferência latino-americana sobre sistemas de informação geográfica/segundo simpósio brasileiro de geoprocessamento**. São Paulo: Epusp, 1993.

SÁ JÚNIOR, A. de. **Aplicação da Classificação de Koppen para o Zoneamento Climático do Estado de Minas Gerais**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Lavra. Depto. de Engenharia Agrícola, Lavras, 2009.

SALES, V.C, PEULVAST, J. P. **Evolução Morfoestrutural do relevo da Margem Continental do Estado do Ceará, Nordeste do Brasil**. Caminhos de Geografia: revista online. V. 07, n. 20. p 01-21. UFC. Uberlândia: 2007. Disponível em: <http://www.ig.ufu.br/revista/caminhos.html>. Acesso em: 12 de fevereiro de 2011.

SALOMÃO, F.X.T. Controle e Prevenção dos Processos Erosivos. In: GUERRA, A.T. (organizador). **Erosão e Conservação dos Solos**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1999.p. 229-265.

SANTOS, K. R dos. **Uso da terra e erosão acelerada: o caso do bairro Geovanni Braga em Anápolis (GO).** In: XII Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada. 2007, Natal. Disponível em:http://extras.ufg.br/uploads/215/original_SANTOS_K_sia_Rodrigues_uso_terra_erosao.pdf. Acesso em: 25 de setembro de 2011.

SANTOS, R. D. **Expressão em Superfície do Sistema de Falhas Poço Verde-Caraúbas, Bacia Potiguar.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Ciências Exatas e da Terra, Programa de Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica, Natal, 2010.

SILVA, A. F. M da. **Análise da Suscetibilidade à Erosão dos Solos na Microracia do Riacho dos Barros, Município de Aratuba – Ceará.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências, Depto. de Geologia, Fortaleza, 2007.

SOARES, F. M. **Evolução das paisagens naturais do Estado do Ceará – Brasil.** Boletim Goiano de Geografia. V. 28, n 1. p. 63-80. Goiânia, 2008.

_____. Bases naturais e esboço do zoneamento geoambiental do estado do Ceará. In: LIMA, L.C. et al. **Compartimentação Territorial e Gestão Regional do Ceará.** Fortaleza: FUNECE, 2000.p. 05-102.

SOUZA, M. J. N. & OLIVEIRA, V. P. V. **Os enclaves úmidos e sub-úmidos do semi-árido do nordeste brasileiro.** In: Mercator - Revista de Geografia da UFC, ano 05I, Nº 9, 85-102, UFC, Fortaleza, 2006.

SOUZA, N. M. **Cartografia Geotécnica.** Depto. de Engenharia Civil e Ambiental, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília. Brasília: 2004. Disponível em: <http://vsites.unb.br/ft/enc/geopro/index.php?option=com_docman&task=doc_view&gid=3&Itemid=30&lang=_>. Acesso em: 17 de setembro de 2011.

STRAHLER, A. N. **Hypsometric analysis of erosional topography.** Geol. Soc. America Bulletin, 1965.

TABALIPA, N. L & FIORI, A. P. **Influência da Vegetação na Estabilidade de Taludes na Bacia do Rio Ligeiro (PR).** Geociências, v 27.n 3, p 387-399. UNESP. São Paulo: 2008.

THOMAS, M. F. **Tropical geomorphology: a study of weathering and landform development in warm climates.** 2 ed. London: MacMillan, 1979.

TORRES, P. F. M., **Aspectos Geológicos e Geocronológicos da Região de Redenção (CE) e adjacências – Contexto Regional e Evolutivo: Sequência Acarape e Suíte Pacatuba.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências, Depto. de Geologia, Fortaleza, 2004.

TORRES, P. F. M., PARENTE, C. V., DANTAS, E. L., ARTHAUD, M. H., FUCK, R. A., NETO, J. A. N., CASTRO, D. L. **Seqüência metavulcano-sedimentar Acarape, CE: aspectos geológicos e isotópicos Sm/Nd.** In: Revista de Geologia, Vol. 10, Nº 2, 163-176, UFC, Fortaleza, 2006.

VALERIANO, M. M. **TOPODATA: guia de utilização de dados geomorfométricos locais,** São José dos Campos: INPE, 2008. Disponível em:http://www.dsr.inpe.br/topodata/data/guia_utilizacao_topodata.pdf. Acesso em: 24 de setembro de 2011.

WALTRICK, P.C. **Erosividade de chuvas no Paraná: atualização, influência do “El niño” e “La niña” e estimativa para cenários climáticos futuros.** Dissertação de Mestrado. Programa de Pós Graduação em Ciência do Solo. Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2010.

WISCHMEIER, W. H. & SMITH, D. D. **Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning.** Agriculture handbook. US. Departament of Agriculture. Washington. DC.1978.

ZUQUETTE, L. V. **Análise crítica da cartografia geotécnica e proposta metodológica para condições brasileiras.** Tese de Doutorado em Geotecnia –

Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo, São Carlos, 1987.

ZUQUETTE, L. V. & NAKAZAWA, V. A. **Cartas de Geologia de Engenharia**. In: OLIVEIRA, A. M. S. & BRITO, S. N. A. (Eds.). Geologia de Engenharia. São Paulo: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia (ABGE), cap. 17, p.283-300. 1998.

ZUQUETTE L. V., GANDOLFI S. **Cartografia geotécnica**. Oficina de Textos, 190p, São Paulo: 2004.



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE CIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA**

CLÍSTENES TEIXEIRA BATISTA

**GEOPROCESSAMENTO APLICADO AO MAPEAMENTO GEOTÉCNICO EM
ESCALA REGIONAL – O CASO DA SERRA DE BATURITÉ, CE**

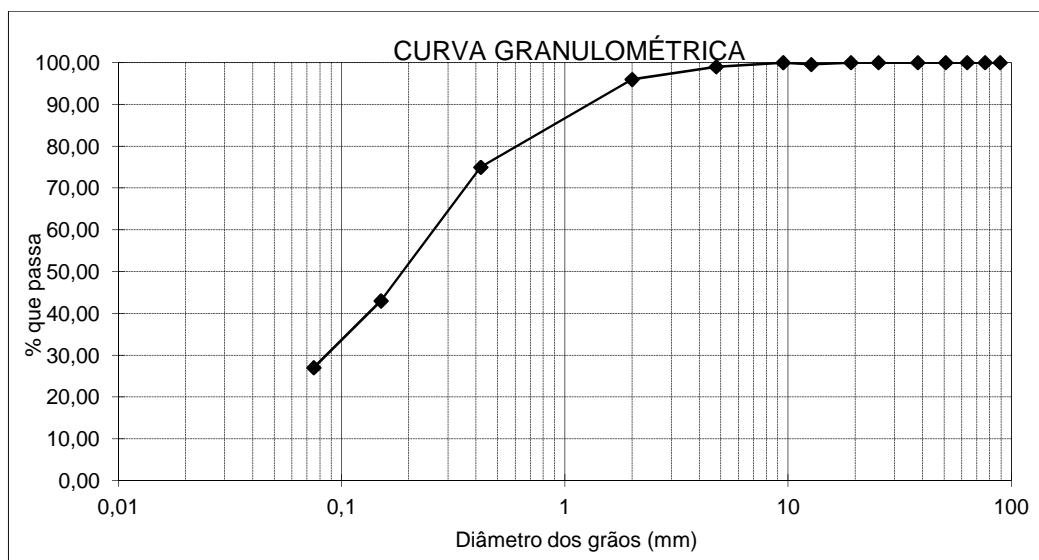
ANEXO – ENSAIOS GEOTÉCNICOS

- **Granulometria**
- **Matéria orgânica**
- **Permeabilidade**

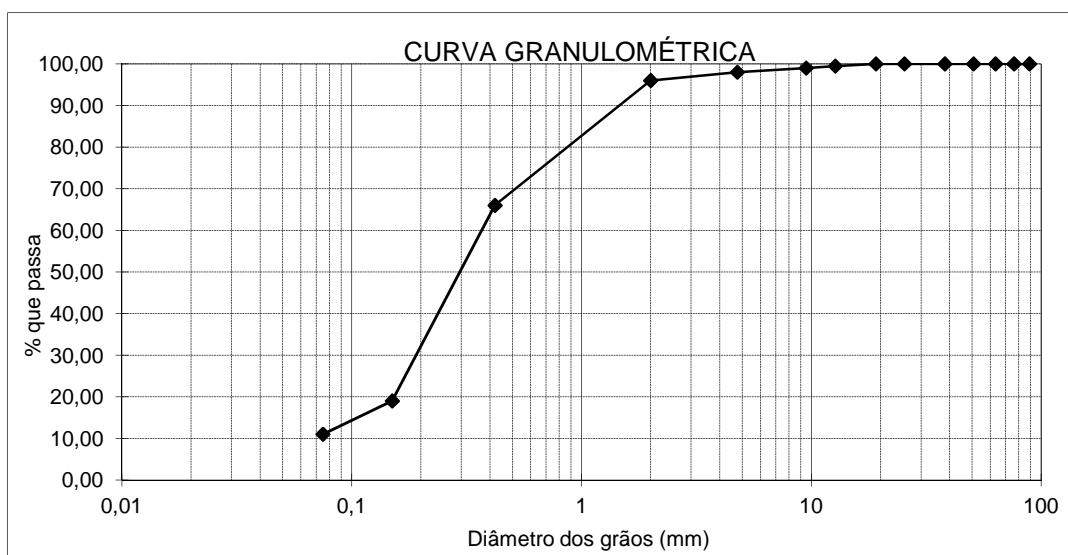
**FORTALEZA
2014**

GRANULOMETRIA

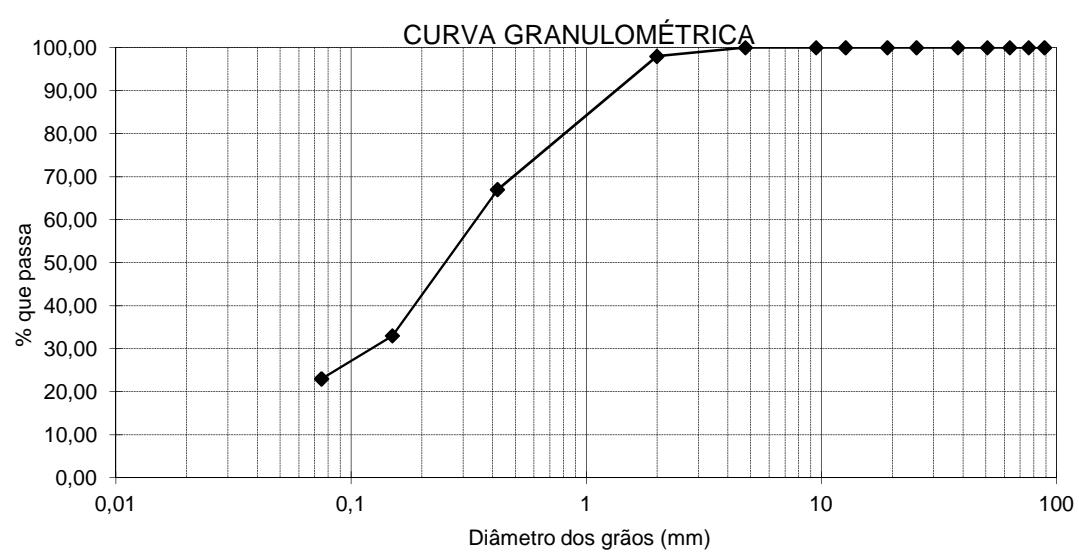
ANÁLISE GRANULOMÉTRICA POR PENEIRAMENTO						
INTERESSADO: CLÍSTENES TEIXEIRA BATISTA					PGF-1	
OBRA:					04/09/12	
UMIDADE						
CÁPSULA Nº	1		AMOSTRA TOTAL		TOTAL	
P.b.h.	50,00		P. ÚMIDO		1000,00	
P.b.s.	50,00		P. RETIDO NA # Nº			
Tara	12,80		10		35,03	
ÁGUA	0,00		P.h. PASSA # Nº 10		964,97	
SOLO	37,20		P.s. PASSA # Nº 10		100,00	
SECO	0,00		P. AMOSTRA SECA		964,97	
UMIDADE %	0,00		1000,00		100,00	
P	PENEIRAS		P.RETIDO PARCIAL		OBSERVAÇÕES:	
E	POLEGADAS		mm			
N	3 1/2"		88,9			
.	3"		76,2			
G	2 1/2"		63,3			
R	2"		50,8			
O	1 1/2"		38,1			
S	1"		25,4			
S	3/4"		19,1			
O	1/2"		12,7			
F	3/8"		9,5		COMP.GRANULOMÉTRICA (%)	
I	Nº 4		4,76			
N	Nº 10		2			
O	Nº 40		0,42			
	Nº 100		0,15			
	Nº 200		0,075		PEDREGULHO: 1 AREIA GROSSA: 3 AREIA MÉDIA: 21 AREIA FINA: 48 SILTE+ARGILA: 27	
			21,83			
			33,66			
			44,51			
			27,70			
			78,17		75	
			44,51		43	
			27,70		27	



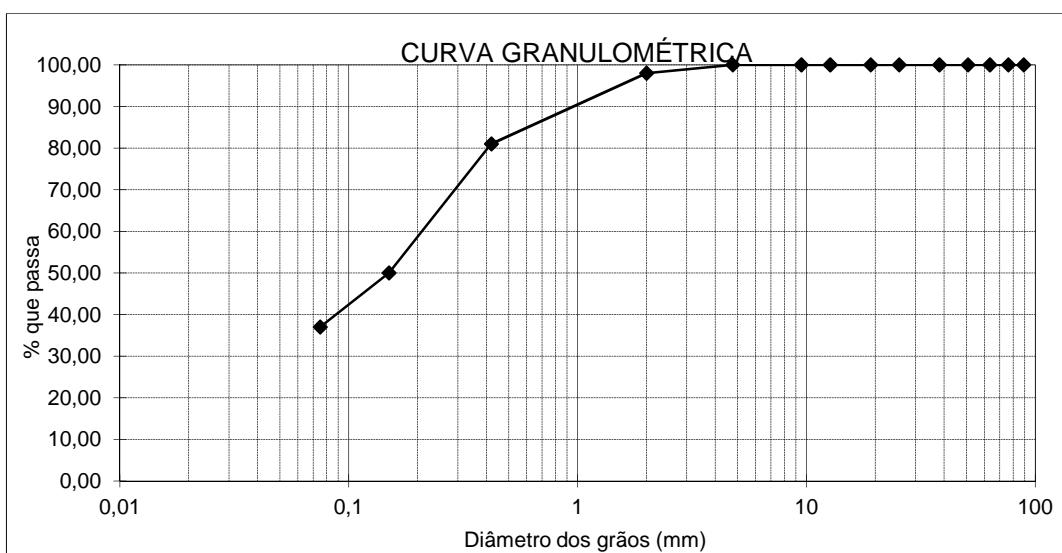
ANÁLISE GRANULOMÉTRICA POR PENEIRAMENTO						
INTERESSADO: CLÍSTENES TEIXEIRA BATISTA					PGF-2	
OBRA:					04/09/12	
UMIDADE						
CÁPSULA Nº P.b.h.	1 50,00		AMOSTRA TOTAL P. ÚMIDO P. RETIDO NA # Nº 10		TOTAL 1000,00	PARCIAL
P.b.s.	50,00		42,30			
Tara	12,80		P.h. PASSA # Nº 10 957,70		100,00	
ÁGUA	0,00		P.s. PASSA # Nº 10 957,70		100,00	
SOLO	37,20		P. AMOSTRA SECA		1000,00	100,00
SECO	0,00					
UMIDADE %						
P E N .G R O S S O	PENEIRAS		P.RETIDO PARCIAL (g)	PESO PASSA (g)	% PASSA AM.TOTAL	OBSERVAÇÕES: COMP.GRANULOMÉTRICA (%) PEDREGULHO: 2 AREIA GROSSA: 2 AREIA MÉDIA: 30 AREIA FINA: 55 SILTE+ARGILA: 11
	POLEGADAS	mm				
	3 1/2"	88,9	0,00	1000,00	100,00	
	3"	76,2	0,00	1000,00	100,00	
	2 1/2"	63,3	0,00	1000,00	100,00	
	2"	50,8	0,00	1000,00	100,00	
	1 1/2"	38,1	0,00	1000,00	100,00	
	1"	25,4	0,00	1000,00	100,00	
	3/4"	19,1	0,00	1000,00	100,00	
	1/2"	12,7	5,18	994,82	99,48	
F I N O	3/8"	9,5	3,80	991,02	99	
	Nº 4	4,76	13,79	977,23	98	
	Nº 10	2	19,53	957,70	96	
	Nº 40	0,42	31,67	68,33	66	
	Nº 100	0,15	48,71	19,62	19	
	Nº 200	0,075	7,91	11,71	11	



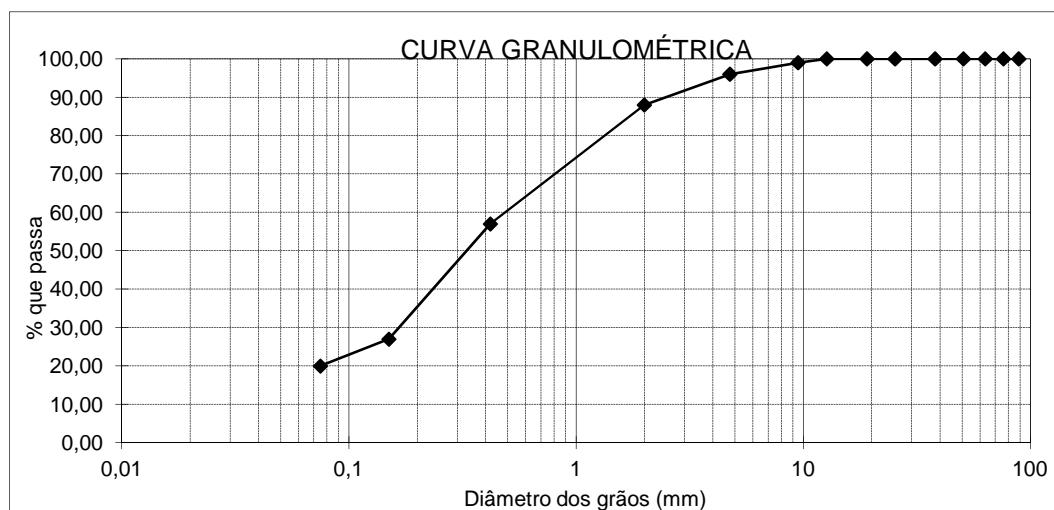
ANÁLISE GRANULOMÉTRICA POR PENEIRAMENTO						
INTERESSADO: CLÍSTENES TEIXEIRA BATISTA					PGF-3	
OBRA:					04/09/12	
UMIDADE						
CAPSULA				AMOSTRA TOTAL	TOTAL	PARCIAL
Nº	1			P. ÚMIDO	1000,00	
P.b.h.	50,00			P. RETIDO NA # Nº		
P.b.s.	50,00			10	19,01	
Tara	12,80			P.h. PASSA # Nº 10	980,99	100,00
ÁGUA	0,00			P.s. PASSA # Nº 10	980,99	100,00
SOLO	37,20			P. AMOSTRA SECA	1000,00	100,00
SECO	0,00					
UMIDADE %						
P	PENEIRAS		P.RETIDO PARCIAL (g)	PESO PASSA (g)	% PASSA	OBSERVAÇÕES:
E	POLEGADAS	mm		AM.TOTAL		
N	3 1/2"	88,9	0,00	1000,00	100,00	
.	3"	76,2	0,00	1000,00	100,00	
G	2 1/2"	63,3	0,00	1000,00	100,00	
R	2"	50,8	0,00	1000,00	100,00	
O	1 1/2"	38,1	0,00	1000,00	100,00	
S	1"	25,4	0,00	1000,00	100,00	
S	3/4"	19,1	0,00	1000,00	100,00	
O	1/2"	12,7	0,00	1000,00	100,00	
F	3/8"	9,5	0,00	1000,00	100	COMP.GRANULOMÉTRICA (%)
I	Nº 4	4,76	0,55	999,45	100	
N	Nº 10	2	18,46	980,99	98	
O						
	Nº 40	0,42	31,69	68,31	67	PEDREGULHO: 0
	Nº 100	0,15	34,38	33,93	33	AREIA GROSSA: 2
	Nº 200	0,075	10,09	23,84	23	AREIA MÉDIA: 31
						AREIA FINA: 44
						SILTE+ARGILA: 23



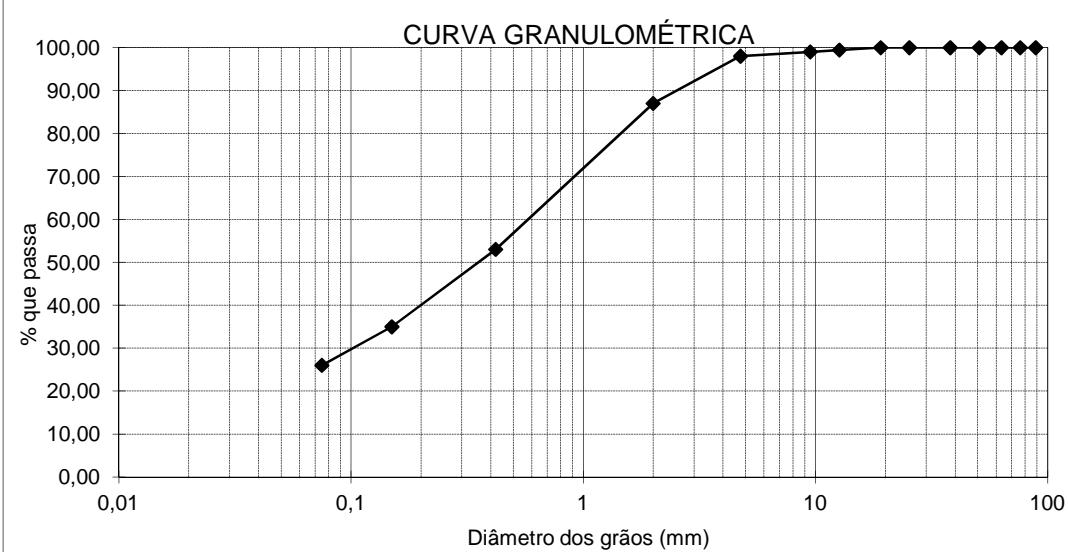
ANÁLISE GRANULOMÉTRICA POR PENEIRAMENTO					
INTERESSADO: CLÍSTENES TEIXEIRA BATISTA PGF-4					
OBRA: 04/09/12					
UMIDADE					
CAPSULA					
Nº	1		AMOSTRA TOTAL	TOTAL	PARCIAL
P.b.h.	50,00		P. ÚMIDO	1000,00	
P.b.s.	50,00		P. RETIDO NA # Nº		
Tara	12,80		10	24,70	
ÁGUA	0,00		P.h. PASSA # Nº 10	975,30	100,00
SOLO			P.s. PASSA # Nº 10	975,30	100,00
SECO	37,20		P. AMOSTRA SECA	1000,00	100,00
UMIDADE	0,00				
%					
P	PENEIRAS		P.RETIDO	PESO	% PASSA
E	POLEGADAS	mm	PARCIAL	PASSA	
N	3 1/2"	88,9	(g)	(g)	AM.TOTAL
.	3"	76,2			OBSERVAÇÕES:
G	2 1/2"	63,3			
R	2"	50,8			
O	1 1/2"	38,1			
S	1"	25,4			
S	3/4"	19,1			
O	1/2"	12,7			
	3/8"	9,5			
	Nº 4	4,76			
	Nº 10	2			
F	Nº 40	0,42	17,08	82,92	81
I	Nº 100	0,15	32,36	50,56	50
N	Nº 200	0,075	12,34	38,22	37
O					



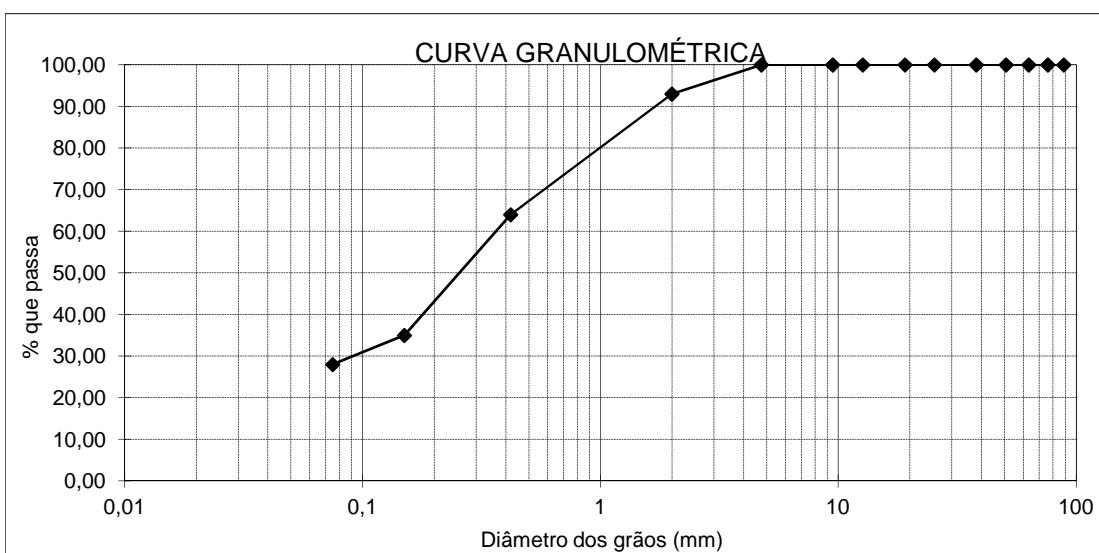
ANÁLISE GRANULOMÉTRICA POR PENEIRAMENTO						
INTERESSADO: CLÍSTENES TEIXEIRA BATISTA					PGM-5	
OBRA:					04/09/12	
UMIDADE						
CAPSULA			AMOSTRA TOTAL	TOTAL	PARCIAL	
Nº	1		P. ÚMIDO	1000,00		
P.b.h.	50,00		P. RETIDO NA # Nº			
P.b.s.	50,00		10	117,74		
Tara	12,80		P.h. PASSA # Nº 10	882,26	100,00	
ÁGUA	0,00		P.s. PASSA # Nº 10	882,26	100,00	
SOLO	37,20		P. AMOSTRA SECA	1000,00	100,00	
SECO	0,00					
UMIDADE						
%						
P	PENEIRAS		P.RETIDO PARCIAL	PESO PASSA	% PASSA	
E	POLEGADAS	mm	(g)	(g)	AM.TOTAL	OBSERVAÇÕES:
N	3 1/2"	88,9	0,00	1000,00	100,00	
.	3"	76,2	0,00	1000,00	100,00	
G	2 1/2"	63,3	0,00	1000,00	100,00	
R	2"	50,8	0,00	1000,00	100,00	
O	1 1/2"	38,1	0,00	1000,00	100,00	
S	1"	25,4	0,00	1000,00	100,00	
S	3/4"	19,1	0,00	1000,00	100,00	
O	1/2"	12,7	0,00	1000,00	100,00	
	3/8"	9,5	5,22	994,78	99	
F	Nº 4	4,76	34,60	960,18	96	COMP.GRANULOMÉTRICA (%)
I	Nº 10	2	77,92	882,26	88	PEDREGULHO: 4
N	Nº 40	0,42	34,88	65,12	57	AREIA GROSSA: 8
N	Nº 100	0,15	33,95	31,17	27	AREIA MÉDIA: 31
O	Nº 200	0,075	8,80	22,37	20	AREIA FINA: 37
						SILTE+ARGILA: 20



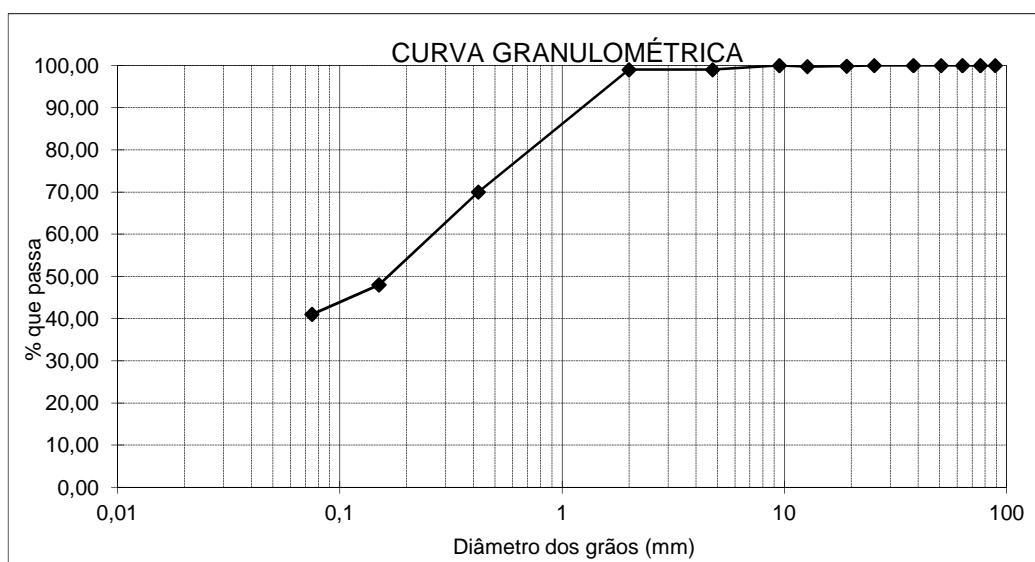
ANÁLISE GRANULOMÉTRICA POR PENEIRAMENTO							
INTERESSADO: CLÍSTENES TEIXEIRA BATISTA					PGM-6		
OBRA:					04/09/12		
UMIDADE CÁPSULA Nº P.b.h.	1 50,00			AMOSTRA TOTAL	TOTAL	PARCIAL	
P.b.s.	50,00			P. ÚMIDO P. RETIDO NA # Nº 10	1000,00 128,50		
Tara	12,80			P.h. PASSA # Nº 10	871,50	100,00	
ÁGUA SOLO SECO	0,00			P.s. PASSA # Nº 10	871,50	100,00	
UMIDADE %	37,20 0,00			P. AMOSTRA SECA	1000,00	100,00	
PENEIRAS POLEGADAS	PENEIRAS		P.RETIDO PARCIAL mm	PESO PASSA (g)	% PASSA AM.TOTAL	OBSERVAÇÕES:	
	POLEGADAS						
	3 1/2"	88,9		1000,00	100,00		
	3"	76,2		1000,00	100,00		
	2 1/2"	63,3		1000,00	100,00		
	2"	50,8		1000,00	100,00		
	1 1/2"	38,1		1000,00	100,00		
	1"	25,4		1000,00	100,00		
	3/4"	19,1		1000,00	100,00		
	1/2"	12,7		5,69	994,31		
	3/8"	9,5		1,07	993,24		
	Nº 4	4,76		14,17	979,07		
	Nº 10	2		107,57	871,50		
FINO	Nº 40	0,42	39,56	60,44	53	COMP.GRANULOMÉTRICA (%) PEDREGULHO: 2 AREIA GROSSA: 11 AREIA MÉDIA: 34 AREIA FINA: 27 SILTE+ARGILA: 26	
	Nº 100	0,15	20,71	39,73	35		
	Nº 200	0,075	9,62	30,11	26		



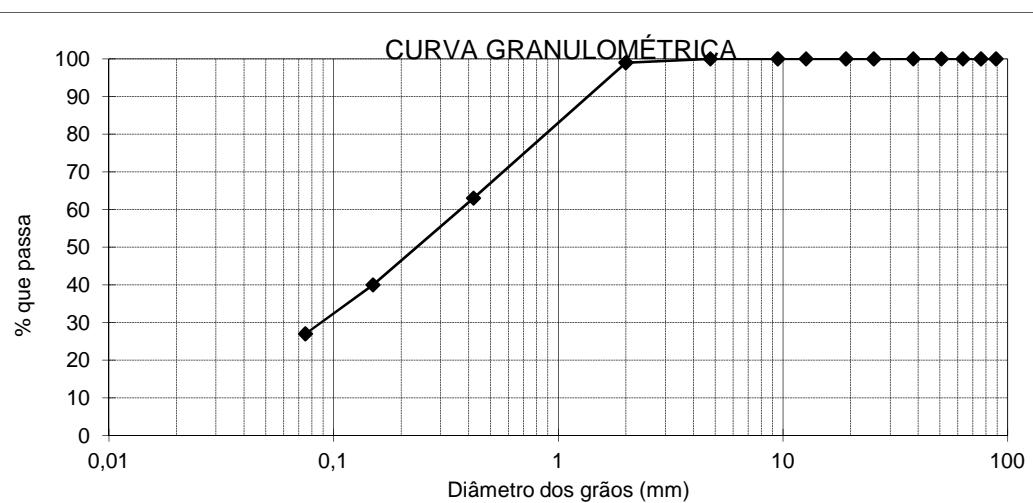
ANÁLISE GRANULOMÉTRICA POR PENEIRAMENTO						
INTERESSADO: CLÍSTENES TEIXEIRA BATISTA					PGT-03	
OBRA:					04/09/12	
UMIDADE						
CÁPSULA			AMOSTRA TOTAL		TOTAL	PARCIAL
Nº	1		P. ÚMIDO	1000,00		
P.b.h.	50,00		P. RETIDO NA # Nº			
P.b.s.	50,00		10	72,70		
Tara	12,80		P.h. PASSA # Nº 10	927,30	100,00	
ÁGUA	0,00		P.s. PASSA # Nº 10	927,30	100,00	
SOLO	37,20		P. AMOSTRA SECA	1000,00	100,00	
SECO	0,00					
UMIDADE						
%						
P	PENEIRAS		P.RETIDO	PESO	% PASSA	OBSERVAÇÕES:
E	POLEGADAS		PARCIAL	PASSA	AM.TOTAL	
N	mm		(g)	(g)		
.	3 1/2"	88,9	0,00	1000,00	100,00	
G	3"	76,2	0,00	1000,00	100,00	
R	2 1/2"	63,3	0,00	1000,00	100,00	
O	2"	50,8	0,00	1000,00	100,00	
S	1 1/2"	38,1	0,00	1000,00	100,00	
S	1"	25,4	0,00	1000,00	100,00	
O	3/4"	19,1	0,00	1000,00	100,00	
F	1/2"	12,7	0,00	1000,00	100,00	
I	3/8"	9,5	0,00	1000,00	100	
N	Nº 4	4,76	0,08	999,92	100	COMP.GRANULOMÉTRICA (%)
O	Nº 10	2	72,62	927,30	93	PEDREGULHO: 0
F	Nº 40	0,42	30,71	69,29	64	AREIA GROSSA: 7
I	Nº 100	0,15	31,15	38,14	35	AREIA MÉDIA: 29
N	Nº 200	0,075	8,53	29,61	28	AREIA FINA: 36
O						SILTE+ARGILA: 28



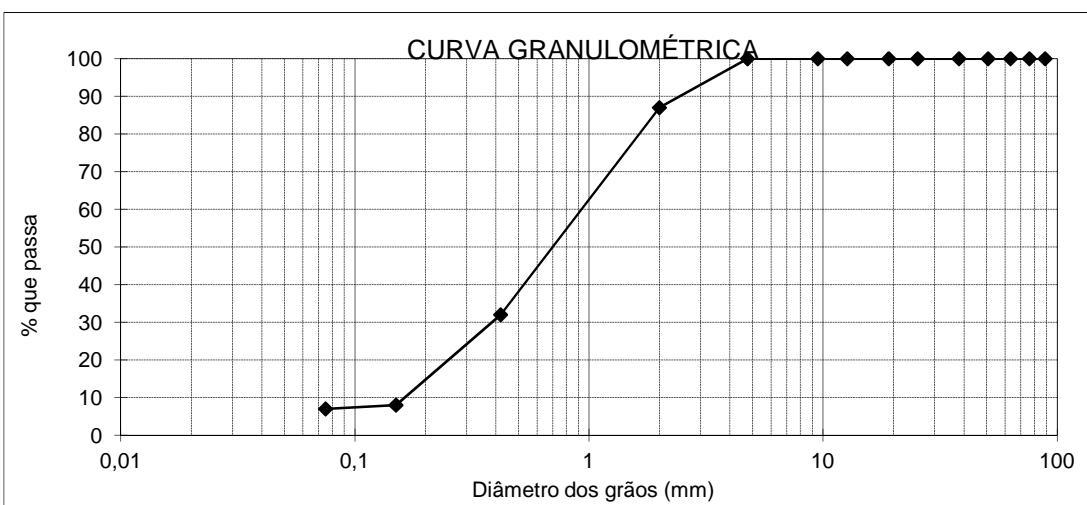
ANÁLISE GRANULOMÉTRICA POR PENEIRAMENTO						
INTERESSADO: CLÍSTENES TEIXEIRA BATISTA					PGT-06	
OBRA:					04/09/12	
UMIDADE						
CÁPSULA			AMOSTRA TOTAL		TOTAL	PARCIAL
Nº	1		P. ÚMIDO		8000,00	
P.b.h.	50,00		P. RETIDO NA # Nº			
P.b.s.	50,00		10		88,39	
Tara	12,80		P.h. PASSA # Nº 10		7911,61	100,00
ÁGUA	0,00		P.s. PASSA # Nº 10		7911,61	100,00
SOLO	37,20		P. AMOSTRA SECA		8000,00	100,00
SECO	0,00					
UMIDADE %						
P	PENEIRAS		P.RETIDO PARCIAL (g)	PESO PASSA (g)	% PASSA	OBSERVAÇÕES:
E	POLEGADAS	mm			AM.TOTAL	
N	3 1/2"	88,9	0,00	8000,00	100,00	
.	3"	76,2	0,00	8000,00	100,00	
G	2 1/2"	63,3	0,00	8000,00	100,00	
R	2"	50,8	0,00	8000,00	100,00	
O	1 1/2"	38,1	0,00	8000,00	100,00	
S	1"	25,4	0,00	8000,00	100,00	
S	3/4"	19,1	11,93	7988,07	99,85	
O	1/2"	12,7	8,60	7979,47	99,74	
F	3/8"	9,5	2,04	7977,43	100	COMP.GRANULOMÉTRICA (%)
I	Nº 4	4,76	20,07	7957,36	99	
N	Nº 10	2	45,75	7911,61	99	
N	Nº 40	0,42	29,36	70,64	70	
O	Nº 100	0,15	22,47	48,17	48	
	Nº 200	0,075	6,86	41,31	41	PEDREGULHO: 1 AREIA GROSSA: 0 AREIA MÉDIA: 29 AREIA FINA: 29 SILTE+ARGILA: 41



ANÁLISE GRANULOMÉTRICA POR PENEIRAMENTO					
INTERESSADO: CLÍSTENES TEIXEIRA BATISTA AMOSTRA: PGT 07					
OBRA: ANALISE DE DOUTORADO 05/12/213					
UMIDADE					
CÁPSULA			AMOSTRA TOTAL		TOTAL
Nº	1		P. ÚMIDO		PARCIAL
P.b.h.	22,74		P. RETIDO NA # Nº		
P.b.s.	22,55		10		
Tara	16,13		P.h. PASSA # Nº 10		
ÁGUA	0,19		P.s. PASSA # Nº 10		
SOLO	6,42		P. AMOSTRA SECA		
SECO	2,96		9714,00		97,13
UMIDADE %					
P	PENEIRAS		P.RETIDO PARCIAL	PESO PASSA (g)	% PASSA
E	POLEGADAS	mm	(g)	AM.TOTAL	OBSERVAÇÕES:
N	3 1/2"	88,9	0,00	9714,00	100
.	3"	76,2	0,00	9714,00	100
G	2 1/2"	63,3	0,00	9714,00	100
R	2"	50,8	0,00	9714,00	100
O	1 1/2"	38,1	0,00	9714,00	100
S	1"	25,4	0,00	9714,00	100
S	3/4"	19,1	0,00	9714,00	100
O	1/2"	12,7	0,00	9714,00	100
	3/8"	9,5	0,00	9714,00	100
F	Nº 4	4,76	0,00	9714,00	100
I	Nº 10	2	51,74	9662,26	99
N	Nº 40	0,42	35,60	61,53	63
N	Nº 100	0,15	21,85	39,68	40
O	Nº 200	0,075	13,55	26,13	27



ANÁLISE GRANULOMÉTRICA POR PENEIRAMENTO							
INTERESSADO: CLÍSTENES TEIXEIRA BATISTA AMOSTRA: PGT 08							
OBRA: ANALISE DE DOUTORADO 05/12/213							
UMIDADE							
CÁPSULA			AMOSTRA TOTAL	TOTAL	PARCIAL		
Nº	1		P. ÚMIDO	1000,00			
P.b.h.	30,72		P. RETIDO NA # Nº				
P.b.s.	30,64		10	125,70			
Tara	15,78		P.h. PASSA # Nº 10	874,30	100,00		
ÁGUA	0,08		P.s. PASSA # Nº 10	869,60	99,46		
SOLO	14,86		P. AMOSTRA SECA	995,30	99,46		
SECO							
UMIDADE	0,54						
%							
P	PENEIRAS		P. RETIDO PARCIAL	PESO PASSA	% PASSA		
E	POLEGADAS	mm	(g)	(g)	AM.TOTAL	OBSERVAÇÕES:	
N	3 1/2"	88,9	0,00	995,30	100		
.	3"	76,2	0,00	995,30	100		
G	2 1/2"	63,3	0,00	995,30	100		
R	2"	50,8	0,00	995,30	100		
O	1 1/2"	38,1	0,00	995,30	100		
S	1"	25,4	0,00	995,30	100		
S	3/4"	19,1	0,00	995,30	100		
O	1/2"	12,7	0,00	995,30	100		
	3/8"	9,5	0,00	995,30	100		
	Nº 4	4,76	0,00	995,30	100		
	Nº 10	2	125,70	869,60	87		
F	Nº 40	0,42	63,29	36,17	32	COMP.GRANULOMÉTRICA (%)	
I	Nº 100	0,15	27,21	8,96	8	PEDREGULHO: 0	
N	Nº 200	0,075	1,52	7,44	7	AREIA: 13	
O						GROSSA: 55	
						AREIA MÉDIA: 25	
						AREIA FINA: 7	
						SILTE+ARGILA: 7	



ANÁLISE GRANULOMÉTRICA POR PENEIRAMENTO

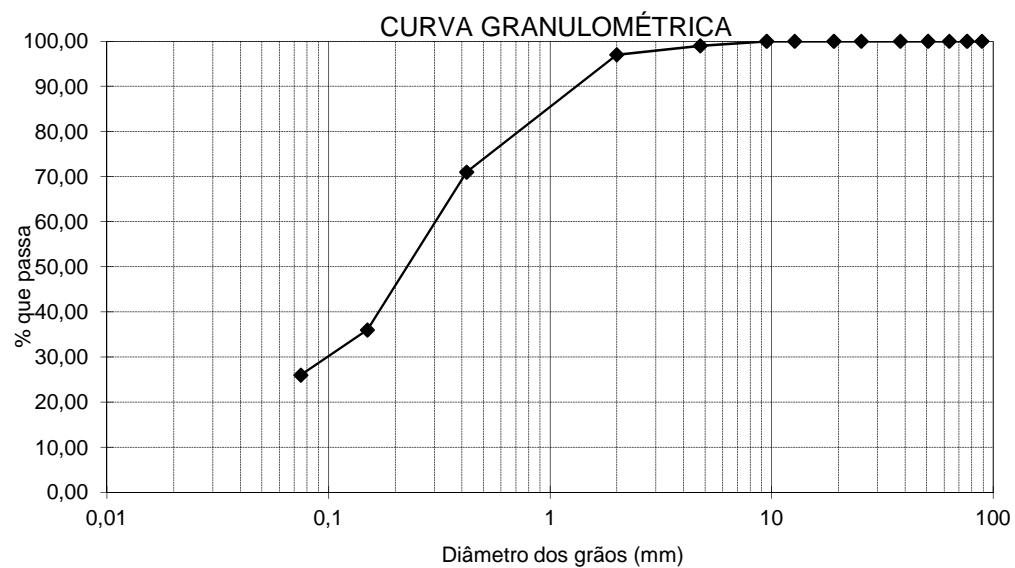
INTERESSADO: CLÍSTENES TEIXEIRA BATISTA

PGT-10

OBRA:

04/09/12

UMIDADE								
CÁPSULA Nº	1		AMOSTRA TOTAL		TOTAL			
P.b.h.	50,00		P. ÚMIDO		1000,00			
P.b.s.	50,00		P. RETIDO NA # Nº		29,06			
Tara	12,80		10		970,94			
ÁGUA	0,00		P.h. PASSA # Nº 10		100,00			
SOLO	37,20		P.s. PASSA # Nº 10		970,94			
SECO	0,00		P. AMOSTRA SECA		1000,00			
UMIDADE %	0,00		P. AMOSTRA SECA		100,00			
P E N G R O S S O F I N O	PENEIRAS		P.RETIDO PARCIAL (g)	PESO PASSA (g)	% PASSA AM.TOTAL			
	POLEGADAS							
	mm							
	3 1/2"							
	3"							
	2 1/2"							
	2"							
	1 1/2"							
	1"							
	3/4"							
	1/2"		1000,00	100,00	OBSERVAÇÕES:			
	3/8"							
	Nº 4							
	Nº 10							
	Nº 40							
	Nº 100							
	Nº 200							
	0,42							
	0,15							
	0,075							
COMP.GRANULOMÉTRICA (%)								
PEDREGULHO: 1								
AREIA GROSSA: 2								
AREIA MÉDIA: 26								
AREIA FINA: 45								
SILTE+ARGILA: 26								



*Responsável

LABORATORIO DE SOLOS
UFC/FUNCENAME

PERMEABILIDADE

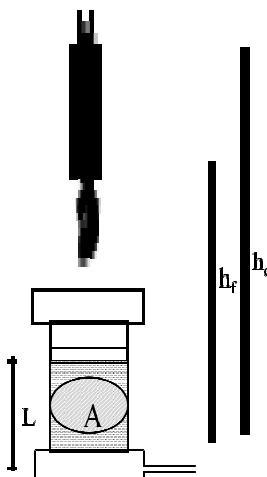
ENSAIO DE PERMEABILIDADE COM CARGA VARIÁVEL

INTERESSADO: CLÍSTENES BATISTA

AMOSTRA: P 1 VS

OBRA:

17/12/2013

 s - PESO ESPECÍFICO SECO MÁXIMO (g/cm^3)

w - UMIDADE ÓTIMA DE COMPACTAÇÃO (%)

M - MASSA ÚMIDA DO CORPO DE PROVA (g)

L - ESPESSURA DO CORPO DE PROVA (cm) 13,2

A - ÁREA DA SEÇÃO TRANSVERSAL DO CORPO DE PROVA (cm^2) 103,87 s - PESO ESPECÍFICO SECO DO CORPO DE PROVA (g/cm^3)

G - GRAU DE COMPACTAÇÃO (%)

a - ÁREA DA SEÇÃO TRANSVERSAL DA BURETA (cm^2) 1,89CALCULO DA UMIDADE DE
COMPACTAÇÃO DO CORPO DE
PROVA

TARA

P.B.H

P.B.S.

UMIDADE (%)

T - TEMPERATURA DO ENSAIO ($^{\circ}\text{C}$)Fc - FATOR DE CORREÇÃO (20°C)h_o - ALTURA INICIAL DO NÍVEL D'ÁGUA (cm)h_f - ALTURA FINAL DO NÍVEL D'ÁGUA (cm)

t - TEMPO DECORRIDO DO ENSAIO (s)

RESULTADO: K₂₀ = 2,8E-05 cm/s

LEITURA	TEMPERATURA ($^{\circ}\text{C}$)	FATOR DE CORREÇÃO	h _o (cm)	h _f (cm)	t (seg)	K ₂₀ (cm/s)
01	29	0,811	122	121	30	2,8E-05
02	29	0,811	122	121	30	2,8E-05
03	29	0,811	122	121	30	2,8E-05

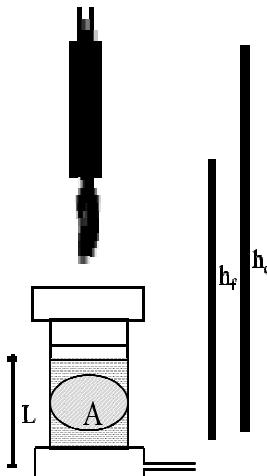
ENSAIO DE PERMEABILIDADE COM CARGA VARIÁVEL

INTERESSADO: CLÍSTENES BATISTA

AMOSTRA: P1 VU

OBRA:

17/12/2013

 \square_s - PESO ESPECÍFICO SECO MÁXIMO (g/cm^3)

w - UMIDADE ÓTIMA DE COMPACTAÇÃO (%)

M - MASSA ÚMIDA DO CORPO DE PROVA (g)

L - ESPESSURA DO CORPO DE PROVA (cm) 13,2

A - ÁREA DA SEÇÃO TRANSVERSAL DO CORPO DE PROVA (cm^2) 103,87 \square_s - PESO ESPECÍFICO SECO DO CORPO DE PROVA (g/cm^3)

G - GRAU DE COMPACTAÇÃO (%)

a - ÁREA DA SEÇÃO TRANSVERSAL DA BURETA (cm^2) 1,89

CALCULO DA UMIDADE DE
COMPACTAÇÃO DO CORPO DE
PROVA

TARA

P.B.H

P.B.S.

UMIDADE (%)

T - TEMPERATURA DO ENSAIO ($^{\circ}\text{C}$)Fc - FATOR DE CORREÇÃO (20°C)h_o - ALTURA INICIAL DO NÍVEL D'ÁGUA (cm)h_f - ALTURA FINAL DO NÍVEL D'ÁGUA (cm)

t - TEMPO DECORRIDO DO ENSAIO (s)

RESULTADO: K₂₀ = 6,5E-04 cm/s

LEITURA	TEMPERATURA ($^{\circ}\text{C}$)	FATOR DE CORREÇÃO	h _o (cm)	h _f (cm)	t (seg)	K ₂₀ (cm/s)
01	29	0,811	122	110	30	6,5E-04
02	29	0,811	122	110	30	6,5E-04
03	29	0,811	122	110	30	6,5E-04

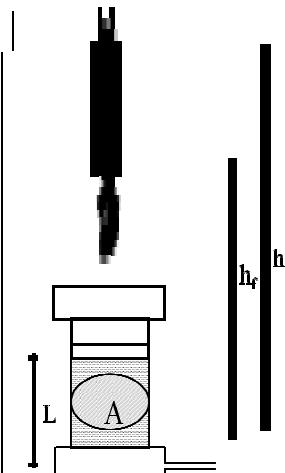
ENSAIO DE PERMEABILIDADE COM CARGA VARIÁVEL

INTERESSADO: CLÍSTENES BATISTA

AMOSTRA: P 4 VU

OBRA:

17/12/2013

 s - PESO ESPECÍFICO SECO MÁXIMO (g/cm^3)

w - UMIDADE ÓTIMA DE COMPACTAÇÃO (%)

M - MASSA ÚMIDA DO CORPO DE PROVA (g)

L - ESPESSURA DO CORPO DE PROVA (cm) 13,2

A - ÁREA DA SEÇÃO TRANSVERSAL DO CORPO DE PROVA (cm^2) 103,87 s - PESO ESPECÍFICO SECO DO CORPO DE PROVA (g/cm^3)

G - GRAU DE COMPACTAÇÃO (%)

a - ÁREA DA SEÇÃO TRANSVERSAL DA BURETA (cm^2) 1,89

CALCULO DA UMIDADE DE
COMPACTAÇÃO DO CORPO DE
PROVA

TARA

P.B.H

P.B.S.

UMIDADE (%)

T - TEMPERATURA DO ENSAIO ($^{\circ}\text{C}$)Fc - FATOR DE CORREÇÃO (20°C)h₀ - ALTURA INICIAL DO NÍVEL D'ÁGUA (cm)h_f - ALTURA FINAL DO NÍVEL D'ÁGUA (cm)

t - TEMPO DECORRIDO DO ENSAIO (s)

RESULTADO: K₂₀ = 1,2E-03 cm/s

LEITURA	TEMPERATURA ($^{\circ}\text{C}$)	FATOR DE CORREÇÃO	h ₀ (cm)	h _f (cm)	t (seg)	K ₂₀ (cm/s)
01	29	0,811	122	100	30	1,3E-03
02	29	0,811	122	101	30	1,2E-03
03	29	0,811	122	101	30	1,2E-03

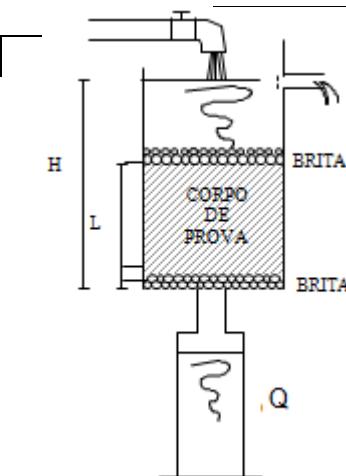
ENSAIO DE PERMEABILIDADE COM CARGA CONSTANTE

 INTERESSADO:
 CLÍSTENES

AMOSTRA: P 4 VS

OBRA:

16/12/2013



Q - VOLUME DE ÁGUA MEDIIDO NA PROVETA
 L - ALTURA DO CORPO DE PROVA
 A - ÁREA DO CORPO DE PROVA
 H - CARGA HIDRÁULICA
 t - TEMPO DECORRIDO DO ENSAIO
 T - TEMPERATURA DO ENSAIO
 Fc - FATOR DE CORREÇÃO

	cm ³
	cm
103,87	cm ²
130,00	cm
	s
28	°C
0,828	

$$K = \frac{Q \cdot L}{A \cdot H \cdot t} \text{ (cm/s)}$$

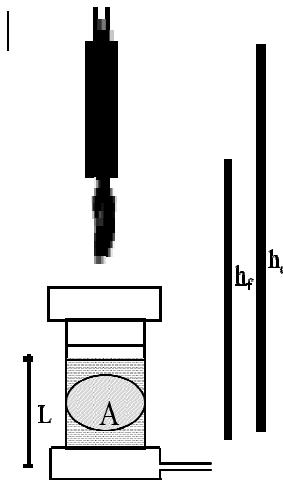
LEITURA Nº	ALTURA L (cm)	Q (cm ³)	t (s)	K (cm/s)
1	12,1	160	90,00	1,3E-03
2	12,1	158	90,00	1,3E-03
3	12,1	154	90,00	1,3E-03
		MÉDIA		1,3E-03

INTERESSADO:
CLÍSTENES

AMOSTRA: P 4 VU

OBRA:

17/12/2013



<input type="checkbox"/> s - PESO ESPECÍFICO SECO MÁXIMO (g/cm³)	-
w - UMIDADE ÓTIMA DE COMPACTAÇÃO (%)	-
M - MASSA ÚMIDA DO CORPO DE PROVA (g)	-
L - ESPESSURA DO CORPO DE PROVA (cm)	13,2
A - ÁREA DA SEÇÃO TRANSVERSAL DO CORPO DE PROVA (cm²)	103,87
<input type="checkbox"/> s - PESO ESPECÍFICO SECO DO CORPO DE PROVA (g/cm³)	-
G - GRAU DE COMPACTAÇÃO (%)	-
a - ÁREA DA SEÇÃO TRANSVERSAL DA BURETA (cm²)	1,89
CALCULO DA UMIDADE DE COMPACTAÇÃO DO CORPO DE PROVA	
TARA	-
P.B.H	-
P.B.S.	-
UMIDADE (%)	-

T - TEMPERATURA DO ENSAIO (°C)

Fc - FATOR DE CORREÇÃO (20°C)

h_o - ALTURA INICIAL DO NÍVEL D'ÁGUA (cm)

h_f - ALTURA FINAL DO NÍVEL D'ÁGUA (cm)

t - TEMPO DECORRIDO DO ENSAIO (s)

RESULTADO: K₂₀ = 8,9E-04 cm/s

LEITURA	TEMPERATURA (°C)	FATOR DE CORREÇÃO	h _o (cm)	h _f (cm)	t (seg)	K ₂₀ (cm/s)
01	29	0,811	122	107	30	8,7E-04
02	29	0,811	122	106	30	9,0E-04
03	29	0,811	122	106	30	9,0E-04

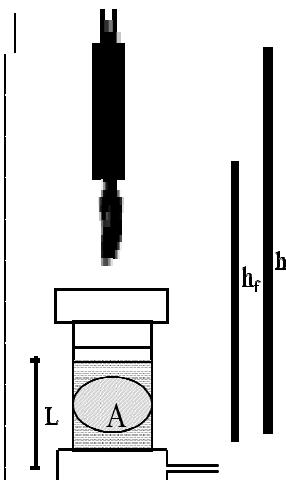
ENSAIO DE PERMEABILIDADE COM CARGA VARIÁVEL

INTERESSADO: CLÍSTENES BATISTA

AMOSTRA: PG 1F

OBRA:

17/12/2013



<input type="checkbox"/> s - PESO ESPECÍFICO SECO MÁXIMO (g/cm³)	-
w - UMIDADE ÓTIMA DE COMPACTAÇÃO (%)	-
M - MASSA ÚMIDA DO CORPO DE PROVA (g)	-
L - ESPESSURA DO CORPO DE PROVA (cm)	11,6
A - ÁREA DA SEÇÃO TRANSVERSAL DO CORPO DE PROVA (cm²)	103,87
<input type="checkbox"/> s - PESO ESPECÍFICO SECO DO CORPO DE PROVA (g/cm³)	-
G - GRAU DE COMPACTAÇÃO (%)	-
a - ÁREA DA SEÇÃO TRANSVERSAL DA BURETA (cm²)	1,89
CALCULO DA UMIDADE DE COMPACTAÇÃO DO CORPO DE PROVA	
TARA	-
P.B.H	-
P.B.S.	-
UMIDADE (%)	-

T - TEMPERATURA DO ENSAIO (°C)

Fc - FATOR DE CORREÇÃO (20°C)

h_o - ALTURA INICIAL DO NÍVEL D'ÁGUA (cm)h_f - ALTURA FINAL DO NÍVEL D'ÁGUA (cm)

t - TEMPO DECORRIDO DO ENSAIO (s)

RESULTADO: K₂₀ = 2,5E-05 cm/s

LEITURA	TEMPERATURA (°C)	FATOR DE CORREÇÃO	h _o (cm)	h _f (cm)	t (seg)	K ₂₀ (cm/s)
01	29	0,811	122	116	360	2,5E-05
02	29	0,811	122	116	360	2,5E-05
03	29	0,811	122	116	360	2,5E-05

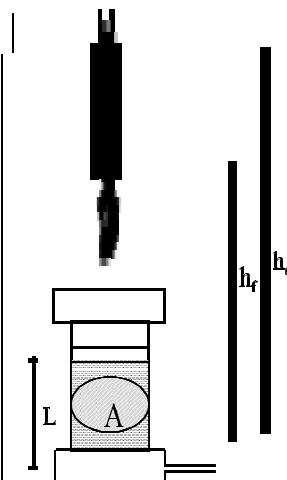
ENSAIO DE PERMEABILIDADE COM CARGA VARIÁVEL

INTERESSADO: CLÍSTENES BATISTA

AMOSTRA: PGF 2

OBRA:

17/12/2013



<input type="checkbox"/> s - PESO ESPECÍFICO SECO MÁXIMO (g/cm³)	-
w - UMIDADE ÓTIMA DE COMPACTAÇÃO (%)	-
M - MASSA ÚMIDA DO CORPO DE PROVA (g)	-
L - ESPESSURA DO CORPO DE PROVA (cm)	13,2
A - ÁREA DA SEÇÃO TRANSVERSAL DO CORPO DE PROVA (cm²)	103,87
<input type="checkbox"/> s - PESO ESPECÍFICO SECO DO CORPO DE PROVA (g/cm³)	-
G - GRAU DE COMPACTAÇÃO (%)	-
a - ÁREA DA SEÇÃO TRANSVERSAL DA BURETA (cm²)	1,89
CALCULO DA UMIDADE DE COMPACTAÇÃO DO CORPO DE PROVA	
TARA	-
P.B.H	-
P.B.S.	-
UMIDADE (%)	-

T - TEMPERATURA DO ENSAIO (°C)

Fc - FATOR DE CORREÇÃO (20°C)

h_o - ALTURA INICIAL DO NÍVEL D'ÁGUA (cm)h_f - ALTURA FINAL DO NÍVEL D'ÁGUA (cm)

t - TEMPO DECORRIDO DO ENSAIO (s)

RESULTADO: K₂₀ = 1,4E-03 cm/s

LEITURA	TEMPERATURA (°C)	FATOR DE CORREÇÃO	h _o (cm)	h _f (cm)	t (seg)	K ₂₀ (cm/s)
01	29	0,811	122	98	30	1,4E-03
02	29	0,811	122	98	30	1,4E-03
03	29	0,811	122	98	30	1,4E-03

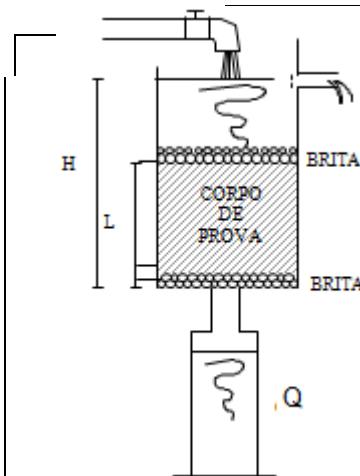
ENSAIO DE PERMEABILIDADE COM CARGA CONSTANTE

 INTERESSADO:
 CLÍSTENES

AMOSTRA: PGF - 3

OBRA:

16/12/2013



Q - VOLUME DE ÁGUA MEDIADO NA PROVETA
 L - ALTURA DO CORPO DE PROVA
 A - ÁREA DO CORPO DE PROVA
 H - CARGA HIDRÁULICA
 t - TEMPO DECORRIDO DO ENSAIO
 T - TEMPERATURA DO ENSAIO
 Fc - FATOR DE CORREÇÃO

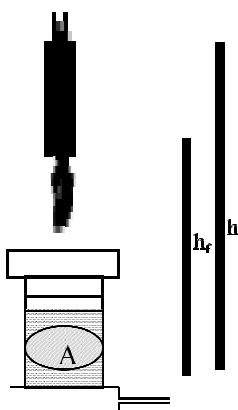
	cm ³
	cm
103,87	cm ²
130,00	cm
	s
28	°C
0,828	

$$K = \frac{Q \cdot L}{A \cdot H \cdot t} \text{ (cm/s)}$$

LEITURA Nº	ALTURA L (cm)	Q (cm ³)	t (s)	K (cm/s)
1	13,2	150	180,00	6,7E-04
2	13,2	150	180,00	6,7E-04
3	13,2	145	180,00	6,5E-04
		MÉDIA		6,7E-04

AMOSTRA: PGF 04

CLISTENES

 γ_s

- PESO ESPECÍFICO APARENTE SECO
- h - UMIDADE NA OCASIÃO DO ENSAIO
- h_o - ALTURA INICIAL DO NÍVEL D'ÁGUA
- h_f - ALTURA FINAL DO NÍVEL D'ÁGUA
- t - TEMPO DECORRIDO DO ENSAIO
- a - ÁREA DA SEÇÃO TRANSVERSAL DA BURETA
- A - ÁREA DA SEÇÃO TRANSVERSAL DO CORPO DE PROVA
- γ_{sm} - ESPESSURA DO CORPO DE PROVA
- PESO ESPECÍFICO APARENTE MÁXIMO DA AMOSTRA
- hot - UMIDADE ÓTIMA DA AMOSTRA
- T - TEMPERATURA DO ENSAIO
- F_c - FATOR DE CORREÇÃO

		g/cm^3
	2,97	%
	190	cm
	189,4	cm
	3600	s
	4,900	cm^2
	86,54	cm^2
	13,20	cm
		g/cm^3
		%
	29	$^{\circ}C$
	0,811	

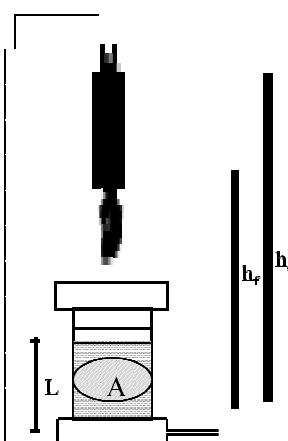
 γ_s

LEITURA	ESPESSURA	g/cm^3	UMIDADE	TEMP.	h_o (cm)	h_f (cm)	t (seg)	K_{20} (cm/s)
---------	-----------	----------	---------	-------	------------	------------	---------	-----------------

01	13,20	1,860	3,0	29	190	189,4	3.600	5,3E-07
02				29	190	189,4	3.600	5,3E-07
03				29	190	189,4	3.600	5,3E-07
04				29	190	189,4	3.600	5,3E-07
						MÉDIA		5,3E-07

AMOSTRA:
PGM 5.1

CLISTENES



γ_s

- PESO ESPECÍFICO APARENTE SECO
- h - UMIDADE NA OCASIÃO DO ENSAIO
- h_o - ALTURA INICIAL DO NÍVEL D'ÁGUA
- h_f - ALTURA FINAL DO NÍVEL D'ÁGUA
- t - TEMPO DECORRIDO DO ENSAIO
- a - ÁREA DA SEÇÃO TRANSVERSAL DA BURETA
- A - ÁREA DA SEÇÃO TRANSVERSAL DO CORPO DE PROVA
- γ_{sm}
- L - ESPESSURA DO CORPO DE PROVA
- PESO ESPECÍFICO APARENTE MÁXIMO DA AMOSTRA
- h_{opt} - UMIDADE ÓTIMA DA AMOSTRA
- T - TEMPERATURA DO ENSAIO
- F_c - FATOR DE CORREÇÃO

	g/cm^3
3,78	%
190	cm
188,8	cm
60	s
4,900	cm^2
84,9	cm^2
13,50	cm
	g/cm^3
	%
29	$^{\circ}C$
0,811	

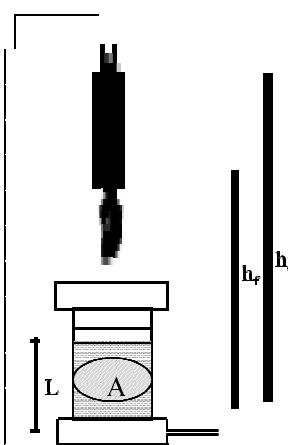
γ_s

FURO	LEITURA	ESPESSURA cm	g/cm^3	UMIDADE h (%)	TEMP. $^{\circ}C$	h_o (cm)	h_f (cm)	t (seg)	K_{20} (cm/s)
------	---------	-----------------	----------	--------------------	----------------------	------------	------------	---------	-----------------

1	01	13,50	1,860	3,8	29	190	188,8	60	6,7E-05
	02				29	190	188,8	60	6,7E-05
	03				29	190	188,8	60	6,7E-05
	04				29	190	188,8	60	6,7E-05
							MÉDIA		6,7E-05

AMOSTRA:
PGM 6.2

CLISTENES



γ_s

- PESO ESPECÍFICO APARENTE SECO
- h - UMIDADE NA OCASIÃO DO ENSAIO
- h_o - ALTURA INICIAL DO NÍVEL D'ÁGUA
- h_f - ALTURA FINAL DO NÍVEL D'ÁGUA
- t - TEMPO DECORRIDO DO ENSAIO
- a - ÁREA DA SEÇÃO TRANSVERSAL DA BURETA
- A - ÁREA DA SEÇÃO TRANSVERSAL DO CORPO DE PROVA
- γ_{sm}
- L - ESPESSURA DO CORPO DE PROVA
- PESO ESPECÍFICO APARENTE MÁXIMO DA AMOSTRA
- h_{opt} - UMIDADE ÓTIMA DA AMOSTRA
- T - TEMPERATURA DO ENSAIO
- F_c - FATOR DE CORREÇÃO

	g/cm^3
6,98	%
190	cm
189,6	cm
60	s
4,900	cm^2
83,28	cm^2
13,10	cm
	g/cm^3
	%
29	$^{\circ}C$
0,811	

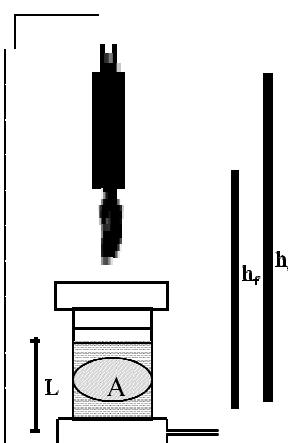
γ_s

FURO	LEITURA	ESPESSURA cm	g/cm^3	UMIDADE h (%)	TEMP. $^{\circ}C$	h_o (cm)	h_f (cm)	t (seg)	K_{20} (cm/s)
------	---------	-----------------	----------	--------------------	----------------------	------------	------------	---------	-----------------

1	01	13,10	1,860	7,0	29	190	189,6	60	2,2E-05
	02				29	190	189,6	60	2,2E-05
	03				29	190	189,6	60	2,2E-05
	04				29	190	189,6	60	2,2E-05
							MÉDIA		2,2E-05

AMOSTRA:
PGT 03

CLISTENES



γ_s

- PESO ESPECÍFICO APARENTE SECO
- h - UMIDADE NA OCASIÃO DO ENSAIO
- h_o - ALTURA INICIAL DO NÍVEL D'ÁGUA
- h_f - ALTURA FINAL DO NÍVEL D'ÁGUA
- t - TEMPO DECORRIDO DO ENSAIO
- a - ÁREA DA SEÇÃO TRANSVERSAL DA BURETA
- A - ÁREA DA SEÇÃO TRANSVERSAL DO CORPO DE PROVA
- γ_{sm}
- L - ESPESSURA DO CORPO DE PROVA
- PESO ESPECÍFICO APARENTE MÁXIMO DA AMOSTRA
- h_{opt} - UMIDADE ÓTIMA DA AMOSTRA
- T - TEMPERATURA DO ENSAIO
- F_c - FATOR DE CORREÇÃO

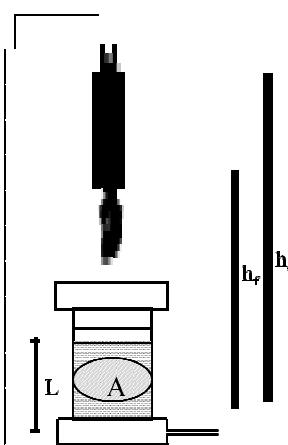
	g/cm^3		
	7,38	%	
	190	cm	
	189,8	cm	
	600	s	
	4,900	cm^2	
	73,86	cm^2	
	12,00	cm	
			g/cm^3
			%
	29	$^{\circ}C$	
	0,811		

γ_s

FURO	LEITURA	ESPESSURA cm	g/cm^3	UMIDADE h (%)	TEMP. $^{\circ}C$	h_o (cm)	h_f (cm)	t (seg)	K_{20} (cm/s)
1	01	12,00	1,860	7,4	29	190	189,8	600	1,1E-06
	02				29	190	189,8	600	1,1E-06
	03				29	190	189,8	600	1,1E-06
	04				29	190	189,8	600	1,1E-06
								MÉDIA	1,1E-06

AMOSTRA:
PGT 06

CLISTENES



γ_s

- PESO ESPECÍFICO APARENTE SECO
- h - UMIDADE NA OCASIÃO DO ENSAIO
- h_o - ALTURA INICIAL DO NÍVEL D'ÁGUA
- h_f - ALTURA FINAL DO NÍVEL D'ÁGUA
- t - TEMPO DECORRIDO DO ENSAIO
- a - ÁREA DA SEÇÃO TRANSVERSAL DA BURETA
- A - ÁREA DA SEÇÃO TRANSVERSAL DO CORPO DE PROVA
- L - ESPESSURA DO CORPO DE PROVA
- PESO ESPECÍFICO APARENTE MÁXIMO DA AMOSTRA
- h_{opt} - UMIDADE ÓTIMA DA AMOSTRA
- T - TEMPERATURA DO ENSAIO
- F_c - FATOR DE CORREÇÃO

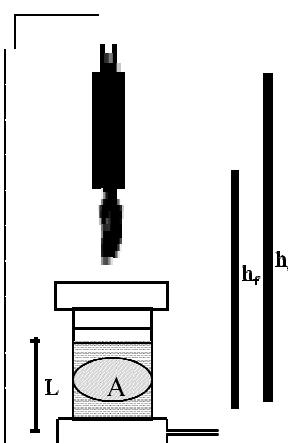
	γ_s	g/cm^3
	7,35	%
	190	cm
	189,5	cm
	60	s
	4,900	cm^2
	88,2	cm^2
	12,60	cm
		g/cm^3
		%
	29	$^{\circ}C$
	0,811	

γ_s

FURO	LEITURA	ESPESSURA cm	γ_s g/cm^3	UMIDADE h (%)	TEMP. $^{\circ}C$	h_o (cm)	h_f (cm)	t (seg)	K_{20} (cm/s)
1	01	13,20	1,860	7,4	29	190	189,5	60	2,6E-05
	02				29	190	189,5	60	2,6E-05
	03				29	190	189,5	60	2,6E-05
	04				29	190	189,5	60	2,6E-05
								MÉDIA	2,6E-05

AMOSTRA:
PGT 07

CLISTENES



γ_s

- PESO ESPECÍFICO APARENTE SECO
- h - UMIDADE NA OCASIÃO DO ENSAIO
- h_o - ALTURA INICIAL DO NÍVEL D'ÁGUA
- h_f - ALTURA FINAL DO NÍVEL D'ÁGUA
- t - TEMPO DECORRIDO DO ENSAIO
- a - ÁREA DA SEÇÃO TRANSVERSAL DA BURETA
- A - ÁREA DA SEÇÃO TRANSVERSAL DO CORPO DE PROVA
- γ_{sm}
- L - ESPESSURA DO CORPO DE PROVA
- PESO ESPECÍFICO APARENTE MÁXIMO DA AMOSTRA
- h_{opt} - UMIDADE ÓTIMA DA AMOSTRA
- T - TEMPERATURA DO ENSAIO
- F_c - FATOR DE CORREÇÃO

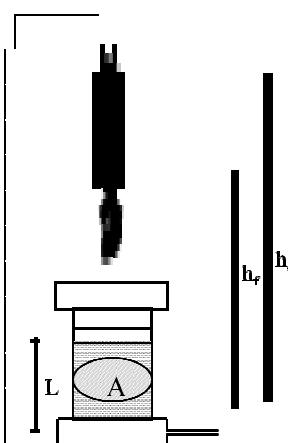
	g/cm^3
2,09	%
190	cm
189,8	cm
600	s
4,900	cm^2
88,2	cm^2
13,20	cm
	g/cm^3
	%
29	$^{\circ}C$
0,811	

γ_s

FURO	LEITURA	ESPESSURA cm	g/cm^3	UMIDADE h (%)	TEMP. $^{\circ}C$	h_o (cm)	h_f (cm)	t (seg)	K_{20} (cm/s)
1	01	13,20	1,860	2,1	29	190	189,8	600	1,0E-06
	02				29	190	189,8	600	1,0E-06
	03				29	190	189,8	600	1,0E-06
	04				29	190	189,8	600	1,0E-06
							MÉDIA		1,0E-06

AMOSTRA:
PGT 08

CLISTENES



γ_s

- PESO ESPECÍFICO APARENTE SECO
- h - UMIDADE NA OCASIÃO DO ENSAIO
- h_o - ALTURA INICIAL DO NÍVEL D'ÁGUA
- h_f - ALTURA FINAL DO NÍVEL D'ÁGUA
- t - TEMPO DECORRIDO DO ENSAIO
- a - ÁREA DA SEÇÃO TRANSVERSAL DA BURETA
- A - ÁREA DA SEÇÃO TRANSVERSAL DO CORPO DE PROVA
- γ_{sm}
- L - ESPESSURA DO CORPO DE PROVA
- PESO ESPECÍFICO APARENTE MÁXIMO DA AMOSTRA
- h_{opt} - UMIDADE ÓTIMA DA AMOSTRA
- T - TEMPERATURA DO ENSAIO
- F_c - FATOR DE CORREÇÃO

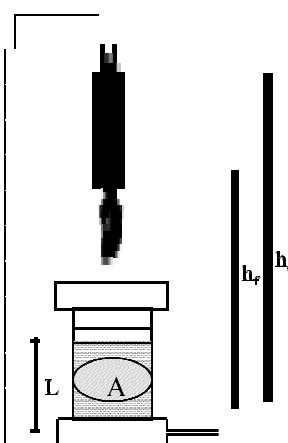
	g/cm^3
11,5	%
190	cm
189,1	cm
60	s
4,900	cm^2
88,2	cm^2
13,20	cm
	g/cm^3
	%
29	$^{\circ}C$
0,811	

γ_s

FURO	LEITURA	ESPESSURA cm	g/cm^3	UMIDADE h (%)	TEMP. $^{\circ}C$	h_o (cm)	h_f (cm)	t (seg)	K_{20} (cm/s)
1	01	13,20	1,860	11,5	29	190	189,1	60	4,7E-05
	02				29	190	189,1	60	4,7E-05
	03				29	190	189,1	60	4,7E-05
	04				29	190	189,1	60	4,7E-05
							MÉDIA		4,7E-05

AMOSTRA:
PGT 10

CLISTENES



γ_s

- PESO ESPECÍFICO APARENTE SECO
- h - UMIDADE NA OCASIÃO DO ENSAIO
- h_o - ALTURA INICIAL DO NÍVEL D'ÁGUA
- h_f - ALTURA FINAL DO NÍVEL D'ÁGUA
- t - TEMPO DECORRIDO DO ENSAIO
- a - ÁREA DA SEÇÃO TRANSVERSAL DA BURETA
- A - ÁREA DA SEÇÃO TRANSVERSAL DO CORPO DE PROVA
- γ_{sm}
- L - ESPESSURA DO CORPO DE PROVA
- PESO ESPECÍFICO APARENTE MÁXIMO DA AMOSTRA
- h_{opt} - UMIDADE ÓTIMA DA AMOSTRA
- T - TEMPERATURA DO ENSAIO
- F_c - FATOR DE CORREÇÃO

	g/cm^3
7,09	%
190	cm
189,8	cm
3600	s
4,900	cm^2
84,9	cm^2
11,50	cm
	g/cm^3
	%
29	$^{\circ}C$
0,811	

γ_s

FURO	LEITURA	ESPESSURA cm	g/cm^3	UMIDADE h (%)	TEMP. $^{\circ}C$	h_o (cm)	h_f (cm)	t (seg)	K_{20} (cm/s)
------	---------	-----------------	----------	--------------------	----------------------	------------	------------	---------	-----------------

1	01	13,20	1,860	7,1	29	190	189,8	3.600	1,8E-07
	02				29	190	189,8	3.600	1,8E-07
	03				29	190	189,8	3.600	1,8E-07
	04				29	190	189,8	3.600	1,8E-07
							MÉDIA		1,8E-07

