



UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA

ESCOLA POLITÉCNICA

MESTRADO EM ENGENHARIA AMBIENTAL URBANA

DISSERTAÇÃO

**IDENTIFICAÇÃO DE ÁREAS SUSCETÍVEIS A
DESLIZAMENTO DE TERRA UTILIZANDO
SISTEMA DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS**

Leonardo Santana de Oliveira Dias

Salvador – Bahia
2006

Livros Grátis

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

LEONARDO SANTANA DE OLIVEIRA DIAS

**IDENTIFICAÇÃO DE ÁREAS SUSCETÍVEIS A
DESLIZAMENTO DE TERRA UTILIZANDO
SISTEMA DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS**

Dissertação submetida ao Curso de Mestrado em Engenharia Ambiental Urbana da Escola Politécnica da Universidade Federal da Bahia como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Ambiental Urbana.

Orientador: Prof. Msc Luís Edmundo Prado de Campos

Salvador – Bahia
2006

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Bernadete Sinay Neves,
Escola Politécnica da UFBA

Dias, Leonardo Santana de Oliveira

D541i Identificação de áreas suscetíveis a deslizamento de terra utilizando sistema de informações geográficas / Leonardo Santana de Oliveira Dias. Salvador, 2006.

75f. : il.

Orientador: Prof. Msc. Luís Edmundo Prado de Campos.
Dissertação (mestrado) – Universidade Federal da Bahia, Escola Politécnica, 2006.

1. Taludes (Mecânica dos solos). 2. Taludes (Geografia física). 3. Geotecnia. I. Campos, Luís Edmundo Prado de. II. Universidade Federal da Bahia. Escola Politécnica. III. Título.

CDD 20.ed. 624.151 36

LEONARDO SANTANA DE OLIVEIRA DIAS

IDENTIFICAÇÃO DE ÁREAS SUSCETÍVEIS A DESLIZAMENTO DE
TERRA UTILIZANDO SISTEMAS DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS

Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Ambiental Urbana.

Salvador, 20 de outubro de 2006.

Banca Examinadora:

Prof. M.Sc. Luis Edmundo Prado de Campos
Universidade Federal da Bahia – UFBA



Prof. Dr. Artur Caldas Brandão
Universidade Federal da Bahia – UFBA



Profa Dra. Noris Costa Diniz
Universidade de Brasília - UnB



DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a minha esposa Elisabeth, pelo seu amor incondicional e principalmente por sua paciência extrema, e ao nosso primeiro filho Guilherme.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a DEUS por estar vivo e ter a oportunidade de conviver com ótimas pessoas nesses meus trinta e três anos de vida.

Um muito obrigado a meus pais, Eduardo e Terezinha, pelo sacrifício pessoal e investimento em minha educação, para meu irmão Eduardo, pelas horas de convívio e pelos incentivos diretos e indiretos ao meu crescimento pessoal.

Um agradecimento mais que especial ao meu amigo e orientador Luís Edmundo, por todas as oportunidades concedidas, por acreditar e viabilizar a conclusão desse trabalho, aos meus amigos e colaboradores Alexandre Cerqueira e Sérgio Barreto, pelas horas de discussão, trabalho e ajuda na conclusão dessa jornada.

Agradeço a Emanuel Barras pelos momentos e pelas idéias que muito contribuíram, e a João Ilton, pela atenção e comentários ao ler esta dissertação.

Aos colegas da SRH: Eduardo Cardoso, Paulo Henrique, Glaucio Rocha e Marcos Miranda, pelo bom ambiente e compreensão quando da elaboração deste trabalho.

Aos meus colegas de MEAU, pelas horas de lazer, descontração, dedicação, no período de finalização dos créditos, e por nossas reuniões no QG da casa de Telma Amorim.

Finalmente agradeço a todos que direta ou indiretamente contribuíram para o sucesso deste trabalho.

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Bernadete Sinay Neves,
Escola Politécnica da UFBA

D541i Dias, Leonardo Santana de Oliveira
Identificação de áreas suscetíveis a deslizamento de terra utilizando sistema de informações geográficas / Leonardo Santana de Oliveira Dias. – Salvador, 2006.

75f. : il.

Orientador: Prof. MSc. Luís Edmundo Prado de Campos.
Dissertação (mestrado) – Universidade Federal da Bahia, Escola Politécnica, 2006.

1. Taludes (Mecânica dos solos). 2. Taludes (Geografia física). 3. Geotecnia. I. Campos, Luís Edmundo Prado de. II. Universidade Federal da Bahia. Escola Politécnica. III. Título.

CDD 20 ed. 624.151.36

LEONARDO SANTANA DE OLIVEIRA DIAS

IDENTIFICAÇÃO DE ÁREAS SUSCETÍVEIS A DESLIZAMENTO DE
TERRA UTILIZANDO SISTEMA DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS.

Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Ambiental Urbana.

Salvador, 20 de outubro de 2006.

Banca Examinadora:

Prof. Msc Luís Edmundo Prado de Campos _____
Universidade Federal da Bahia – UFBA

Prof. Dr. Artur Caldas Brandão _____
Universidade Federal da Bahia - UFBA

Prof. Dr. Noris Costa Diniz _____
Universidade de Brasília - UnB

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a minha esposa Elisabeth, pelo seu amor incondicional e principalmente por sua paciência extrema, e ao nosso primeiro filho Guilherme.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a DEUS por estar vivo e ter a oportunidade de conviver com ótimas pessoas nesses meus trinta e três anos de vida.

Um muito obrigado a meus pais, Eduardo e Terezinha, pelo sacrifício pessoal e investimento em minha educação, para meu irmão Eduardo, pelas horas de convívio e pelos incentivos diretos e indiretos ao meu crescimento pessoal.

Um agradecimento mais que especial ao meu amigo e orientador Luís Edmundo, por todas as oportunidades concedidas, por acreditar e viabilizar a conclusão desse trabalho, aos meus amigos e colaboradores Alexandre Cerqueira e Sérgio Barreto, pelas horas de discussão, trabalho e ajuda na conclusão dessa jornada.

Agradeço a Emanuel Barras pelos momentos e pelas idéias que muito contribuíram, e a João Ilton, pela atenção e comentários ao ler esta dissertação.

Aos colegas da SRH: Eduardo Cardoso, Paulo Henrique, Glaucio Rocha e Marcos Miranda, pelo bom ambiente e compreensão quando da elaboração deste trabalho.

Aos meus colegas de MEAU, pelas horas de lazer, descontração, dedicação, no período de finalização dos créditos, e por nossas reuniões no QG da casa de Telma Amorim.

Finalmente agradeço a todos que direta ou indiretamente contribuíram para o sucesso deste trabalho.

SUMÁRIO

LISTA DE SÍMBOLOS	iii
LISTA DE FIGURAS	iv
LISTA DE TABELAS	v
RESUMO	vi
ABSTRACT	vii
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. CONTEXTO E JUSTIFICATIVA DA PESQUISA	1
1.2. OBJETIVOS	3
1.3. ROTEIRO METODOLÓGICO	4
1.4. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	5
2. AVALIAÇÕES DE DESLIZAMENTO DE TERRA	6
2.1. CARACTERÍSTICAS DO FENÔMENO	6
2.2. INVESTIGAÇÕES GEOTÉCNICAS	8
2.2.1. Sondagens a Percussão com SPT (Standard Penetration Test)	8
2.2.2. Amostras Retiradas para Ensaios em Laboratório	8
2.3. MODELAGEM MATEMÁTICA E CÁLCULO DO FATOR DE SEGURANÇA (FS)	9
3. FERRAMENTAS DE PLANEJAMENTO URBANO PARA OCUPAÇÃO DE ENCOSTAS	12
3.1. CONSIDERAÇÕES SOBRE CARTOGRAFIA GEOTÉCNICA	12
3.2. SISTEMAS DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS (SIG) E ANÁLISE ESPACIAL	16
3.2.1. Banco de Dados em Mapeamento Geotécnico	16
3.2.2. Sistemas de Informações Geográficas (SIG)	18
3.2.3. Topografia e Modelo Numérico do Terreno (MNT)	19
4. MAPA DE SUSCETIBILIDADE A DESLIZAMENTO	22
4.1. DEFINIÇÃO DE MAPA DE SUSCETIBILIDADE	22

4.2. MÉTODOS DE ELABORAÇÃO	24
5. MATERIAL E MÉTODOS	27
5.1. ÁREA DE ESTUDO	27
5.1.1. Localização e Justificativa	27
5.1.2. Caracterização da Área	28
5.1.3. Base Cartográfica	29
5.2. LEVANTAMENTO DE DADOS GEOTÉCNICOS	32
5.2.1. Tipos de Informações Geotécnicas	33
5.2.2. Georreferenciamento das Amostras Indeformadas	33
5.3. MODELO NUMÉRICO DE TERRENO	35
5.3.1. Módulo Topo to Raster do Software ArcGIS 9x	36
5.3.2. Declividade	37
5.4. MODELAGEM MATEMÁTICA	38
5.4.1. Cálculo do Fator de Segurança (FS)	39
5.4.2. Distribuição Geográfica dos Parâmetros Geotécnicos	39
5.4.3. Cenários de Suscetibilidade	40
5.4.4. Visita a Campo e Pontos Suscetíveis a Deslizamento	41
6. RESULTADOS E DISCUSSÕES	42
6.1. DADOS GEOTÉCNICOS	42
6.2. DISTRIBUIÇÃO GEOGRÁFICA DOS PARÂMETROS GEOTÉCNICOS	45
6.3. CENÁRIOS DE SUSCETIBILIDADE OBTIDOS DA MODELAGEM MATEMÁTICA	51
6.3.1. Parâmetros de Resistência Obtidos de Ensaios na Umidade Natural	52
6.3.2. Parâmetros de Resistência Obtidos de Ensaios Inundados ou Saturados	55
6.4. VISITA A CAMPO PARA A OBSERVAÇÃO DE PONTOS CRÍTICOS	60
7. CONCLUSÕES	66
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	68

LISTA DE SÍMBOLOS

c - coesão do solo [$ML^{-1}T^{-2}$]

FS - Fator de Segurança

h - profundidade da superfície de ruptura [L]

β - ângulo de declividade [GRAUS]

γ - peso específico do solo [$ML^{-1}T^{-3}$]

γ_s - peso específico do solo saturado [$ML^{-1}T^{-3}$]

γ_w - peso específico do solo não saturado [$ML^{-1}T^{-3}$]

ϕ - ângulo de atrito [GRAUS]

ψ - razão entre a poro-pressão e peso específico da água

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Esquema representando o roteiro metodológico.	4
Figura 2 – Representação das condições de umidade em talude infinito.	10
Figura 3 – Exemplo de uma representação gráfica de um MNT da região de Vila Nova de Pituaçu na Av. Paralela.	20
Figura 4 – Modelo de grid regular (a), rede de triângulos irregulares (b) e linhas de contorno (c).	20
Figura 5 – Localização da área de estudo.	28
Figura 6 – Base cartográfica da área de estudo sem as curvas de nível.	31
Figura 7 – Distribuição das amostras indeformadas para Salvador.	36
Figura 8 – Representação gráfica do modelo numérico de terreno da área de estudo.	37
Figura 9 – Mapa de variação do ângulo de declividade.	38
Figura 10 – Distribuição geográfica das amostras indeformadas para a área e entorno.	43
Figura 11 – Distribuição geográfica da coesão para umidade natural.	46
Figura 12 – Distribuição geográfica da coesão para material inundado ou saturado.	47
Figura 13 – Distribuição geográfica do ângulo de atrito para umidade natural.	48
Figura 14 – Distribuição geográfica do ângulo de atrito para o material inundado ou saturado.	49
Figura 15 – Distribuição geográfica do peso específico.	50
Figura 16 – Cenário de simulação para a umidade natural e superfície de ruptura com profundidade de 3 metros.	53
Figura 17 – Cenário de simulação para a umidade natural e superfície de ruptura com profundidade de 4 metros.	54
Figura 18 – Cenário de simulação para um material inundado ou saturado e superfície de ruptura com profundidade de 1 metro.	56
Figura 19 – Cenário de simulação para um material inundado ou saturado e superfície de ruptura com profundidade de 2 metros.	57
Figura 20 – Cenário de simulação para um material inundado ou saturado e superfície de ruptura com profundidade de 3 metros	58

Figura 21 – Cenário de simulação para um material inundado ou saturado e superfície de ruptura com profundidade de 4 metros.	59
Figura 22 – Mapa de suscetibilidade a deslizamento de terra e a distribuição de pontos visitados em campo.	61
Figura 23 – Fotografia de um talude de 8 a 10 metros com pouca vegetação apresentando sulcos de erosão.	62
Figura 24 – Fotografia de uma contenção de cortina atirantada na ligação entre Av. Vasco da Gama e o Dique do Tororó.	62
Figura 25 – Figura de um talude com intervenção da PMS apresentando uma solução de solo grampeado implementada e em implementação.	63
Figura 26 – Fotografia de uma alvenaria de pedra na base do talude localizado no Dique do Tororó.	63
Figura 27 – Fotografia de uma (a) cicatriz de um escorregamento ocorrido em março de 2005 e (b) do rompimento da tubulação de esgoto.	64
Figura 28 – Fotografia de um talude íngreme totalmente vegetado no Vale do Ogunjá.	64
Figura 29 – Fotografia de um talude íngreme e pouco vegetado apresentando construções em sua base no Vale do Ogunjá.	65

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Índice de qualidade do georreferenciamento do material disponível.	34
Tabela 2 – Definição das classes de estabilidade baseada nos valores de FS.	40
Tabela 3 – Distribuição do índice de qualidade de georreferenciamento das amostras indeformadas da área e seu entorno.	44
Tabela 4 – Análise exploratória dos parâmetros geotécnicos disponíveis. Unidades: Ângulo de atrito (Φ) em graus, coesão (C) em KPa e peso específico (γ) kN/m ³ .	45
Tabela 5 – Variação do percentual de áreas suscetíveis a deslizamento a medida que a profundidade da frente de umedecimento ou superfície de ruptura aumenta.	55

RESUMO

Salvador sofre com os constantes deslizamentos de terra que ocorrem durante e após o período de chuvas. Este fenômeno é responsável por prejuízos econômicos e vem fazendo um grande número de vítimas fatais. A dinâmica acelerada da ocupação de áreas de risco faz com que o Poder Público necessite de uma ferramenta que possibilite a definição de áreas suscetíveis a deslizamento de terra com o intuito auxiliar nas ações de intervenção. A integração entre os sistemas de informações geográficos (SIG) com os modelos matemáticos previsionais, baseado na equação para análise de estabilidade de taludes, permitem que grandes áreas sejam avaliadas. Como aplicação da metodologia foi escolhida uma região de Salvador visando avaliar o cenário de suscetibilidade a deslizamento. Foram definidos, para as condições de solo na umidade natural e saturada, seis cenários de análise onde a superfície de ruptura variou de 1 a 4 metros de profundidade. Os resultados apresentados evidenciaram a boa resposta obtida pelo modelo matemático utilizado, mesmo sendo um modelo simples, em relação ao que foi observado em campo.

Palavras-chave: Suscetibilidade, mapeamento, talude e SIG.

ABSTRACT

Salvador suffers with constant landslides that occur during and after the period of rains. This phenomenon is responsible for economic damages and makes a great number of fatal victims. The accelerated dynamics of the occupation of risk areas shows the need of a tool that aids the Government Agencies to define susceptible areas of landslide with the intention to support interventions. The integration between the geographic information systems (GIS) and a prevision mathematical model, based in the equation for analysis of slope stability, allows the evaluation of extended areas. For an application of the methodology was chosen a region of Salvador aimed to evaluate the landslide susceptibility scene. It was defined for soil natural and saturated condition, six scenes of analysis where the rupture surface varied of 1 to 4 meters of depth. Even with a simple mathematical model being used, the presented results evidenced a good reply from model in relation with what was observed in the field.

Keywords: Susceptibility, mapping, slope and GIS.

Capítulo 1

Introdução

1.1. CONTEXTO E JUSTIFICATIVA DA PESQUISA

Os deslizamentos de terra vêm fazendo um grande número de vítimas fatais e gerando prejuízos relacionados com a destruição de construções, sendo considerado pela ONU, como uma catástrofe somente inferior aos terremotos e inundações entre os fenômenos naturais que mais afetam a humanidade (CAMPOS, 1984, REDIVO et al, 2003, GUIMARÃES, 2000 e FERNANDES e AMARAL, 1996).

Como várias cidades brasileiras, Salvador vive o problema de uma ocupação desordenada de suas áreas de relevo acidentado que em regimes de chuva apresentam a incidência de movimentos de terra. O trabalho apresentado por Fernandes da Silva (1994), bem como, pelos os estudos executados pela OCEPLAN (1981) e pelo relatório apresentado pelo Grupo de Estudos Técnicos das Áreas de Risco de Encostas de Salvador (PMS, 1996), evidenciam a predisposição que a cidade tem ao fenômeno de deslizamento de terra.

A deflagração de um deslizamento pode estar condicionada a fatores físicos predisponentes bem como a fatores sócio-comportamentais, onde o grande desafio da comunidade científica e governamental está relacionado à tentativa de prever as porções de relevo mais sujeitas à ocorrência destes fenômenos, porém, essa predição envolve vários fatores, o que se caracteriza como de difícil solução (GUIMARÃES, 2000).

Em função disso, a elaboração de diagnósticos e a tomada de decisões sobre o meio físico com a finalidade de estabelecer diretrizes para a ocupação racional do solo, são cada vez mais prementes, especialmente, no que diz respeito ao direcionamento da expansão urbana para áreas mais favoráveis a ocupação (VALENTE, 1999).

O crescimento da ocupação urbana das encostas tem uma dinâmica mais acelerada do que qualquer ação mitigadora que possa ser executada pelo poder público (JESUS et al, 2005a). O desenvolvimento e implementação de uma ferramenta que permita definir uma forma de se priorizar áreas de intervenções na cidade é importante para o planejamento urbano.

Nesse contexto, os princípios e técnicas relacionadas com a cartografia geotécnica procuram, por meio da avaliação das diferentes características do meio físico, delimitar áreas favoráveis ou desfavoráveis ao uso e ocupação humana. Barros (1996) e Zuquette (1987) vêem a cartografia geotécnica como uma ferramenta direcionada ao planejamento urbano.

A cartografia geotécnica vem se beneficiando dos avanços obtidos pela informática, principalmente pelo uso conjunto com os sistemas de informações geográficas (SIG). Estes sistemas têm como finalidade armazenar, recuperar e analisar dados que estejam relacionados ao espaço geográfico.

O SIG é uma ferramenta que permite a manipulação de diferentes fontes de dados e permitem também a incorporação de modelos matemáticos que auxiliam na definição de áreas propensas ao deslizamento.

Gomes et al (2005) afirmam que metodologias têm sido desenvolvidas para a previsão de movimentos de massa com base em modelos matemáticos. Estes podem ser subdivididos entre os modelos empíricos e os que se baseiam em leis físicas. Dentre os modelos empíricos existem os baseados em inventários de deslizamento, os que utilizam análises estatísticas e os que combinam diversos planos de informação (geologia, vegetação, uso do solo e declividade). Os modelos baseados em leis físicas vêm permitir que hipóteses bem específicas sejam testadas tanto na escala da encosta como na escala da bacia de drenagem.

As implementações em SIG baseadas em modelos físicos, tipo SHALSTAB (GUIMARÃES, 2000) e SINMAP (PARCK et al, 1998), têm como princípio o método do equilíbrio limite e utilizam a equação do talude infinito para definir áreas potenciais a deslizamento.

A análise de equilíbrio limite considera que as forças que tendem a induzir a ruptura são exatamente balanceadas pelos esforços de resistência. A fim de comparar a estabilidade de taludes em diferentes condições de equilíbrio limite, define-se o fator de segurança (FS) como a razão entre a ação das forças que desestabilizam e as forças que resistem ao deslizamento (GUIDICINI e NIEBLE, 1976). Segundo Massad (2003), os taludes infinitos tratam-se de encostas naturais que se caracterizam pela sua grande extensão e pela reduzida espessura de manto de solo. Eles se baseiam nos princípios de que a superfície de ruptura é paralela à inclinação do talude e a profundidade da superfície de ruptura é pequena quando comparada com a altura do talude.

1.2. OBJETIVOS

De acordo com o que já foi exposto, este trabalho tem o objetivo de definir áreas suscetíveis a ocorrência de deslizamento de terra utilizando-se sistema de Informações geográficas. Dentro deste contexto são enumerados os seguintes objetivos específicos:

1. Avaliação de modelo numérico de terreno (MNT) de detalhe a partir das curvas de nível da base cartográfica;
2. Aplicar formulação matemática para definir um mapa contendo as áreas suscetíveis a deslizamento de terra;
3. Checar em campo algumas áreas definidas como suscetíveis ao deslizamento.

1.3. ROTEIRO METODOLÓGICO

Para o desenvolvimento deste trabalho adotou-se o roteiro metodológico a seguir apresentado (figura 1).

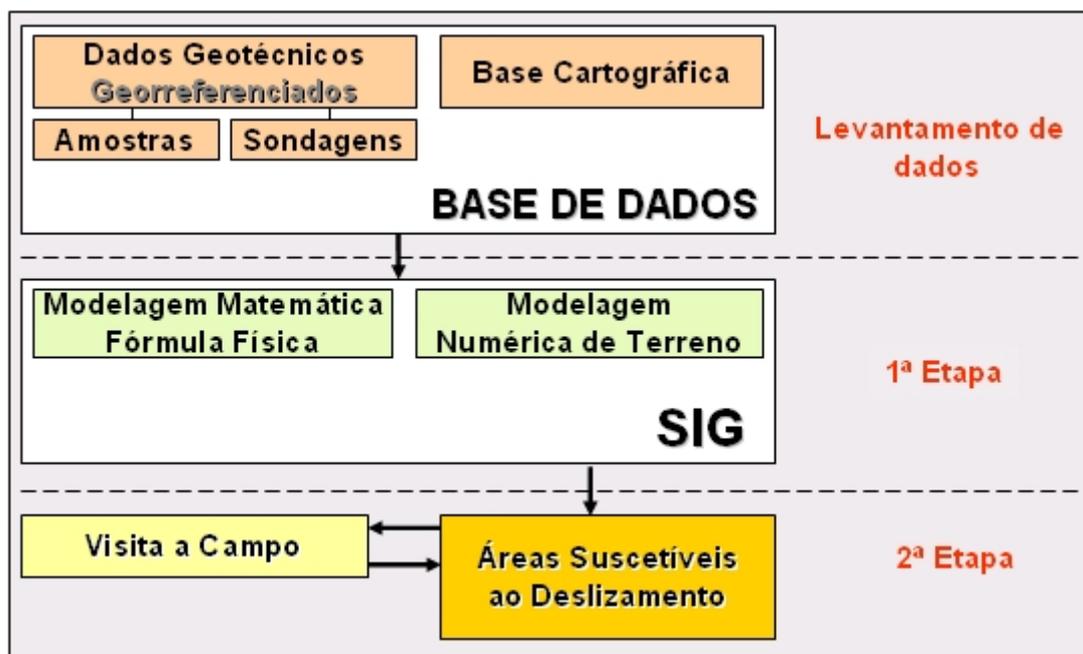


Figura 1 – Esquema representando o roteiro metodológico.

Os principais dados utilizados nesta pesquisa foram obtidos do convênio firmado entre o laboratório de Geotecnia da Universidade Federal da Bahia (UFBA) e a Prefeitura Municipal de Salvador (PMS). Este convênio também permitiu o acesso a base cartográfica digital elaborada pela Companhia de Desenvolvimento Urbano do Estado da Bahia (CONDER).

Este convênio fez o laboratório de Geotecnia participar da execução do Plano Diretor Encostas (PDE) de Salvador. O laboratório contribuiu com a elaboração e montagem de um banco de dados georreferenciado, contendo informações provenientes dos ensaios laboratoriais realizados em amostras do tipo indeformadas e dos dados obtidos da execução de sondagens a percussão.

Da base cartográfica obtida na CONDER foram extraídas as informações referentes a caracterização da área, cobrindo os temas referentes a altimetria, hidrografia, ocupação urbana e ruas. A base foi elaborada na escala 1:2.000 e possui as seguintes características cartográficas: projeção Universal Transversa de Mercator (UTM), datum

planimétrico SAD69, datum altimétrico em Ibituba-SC e articulação cartográfica padrão SICAR.

No início da 1ª etapa dos trabalhos foi desenvolvida uma revisão bibliográfica na qual se destacaram os trabalhos de Campos (1984), Savage et al (2004) e de Guimarães (2000). A revisão permitiu a definição da formulação física utilizada e a definição da metodologia para se elaborar o MNT da área. Os conceitos obtidos do trabalho de Campos (1984) foram importantes na avaliação dos resultados e conclusões. Esta etapa se caracterizou pelo uso mais intenso do SIG e pela definição da área de estudo.

A 2ª etapa consistiu da avaliação do mapa preliminar que definiu as áreas suscetíveis ao deslizamento de terra. Este mapa subsidiou uma visita a campo para checar a qualidade dos dados obtidos pela modelagem. Nesta visita foram coletadas fotografias para ilustrar os resultados obtidos e foram executadas caracterizações de algumas áreas.

1.4. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Este trabalho encontra-se dividido em oito capítulos, incluindo este capítulo introdutório. Os capítulos 2, 3 e 4 representam a revisão bibliográfica deste trabalho. O capítulo 2 apresenta uma revisão na área de deslizamento de terras, tecendo algumas considerações sobre o processo de diminuição da resistência ao cisalhamento dos solos relacionado com o aumento da saturação e apresenta a formulação física adotada. O capítulo 3 dá ênfase nos tópicos: considerações sobre a cartografia geotécnica, sistema de informações geográficas e análise espacial. O capítulo 4 aborda a definição de mapas de suscetibilidade a deslizamento de terra e os métodos de elaboração destes mapas. No capítulo 5 são apresentadas a área piloto deste estudo e a metodologia utilizada neste trabalho, onde são descritas as principais características da base de dados que foi utilizada, bem como, as etapas que foram executadas para se obter o mapa de áreas suscetíveis ao deslizamento de terra. O capítulo 6 apresenta os resultados obtidos após a implementação da formulação física e do modelo matemático utilizado, bem como as observações obtidas após a visita a campo. As conclusões deste trabalho são apresentadas no capítulo 7. O capítulo 8 apresenta todos os trabalhos consultados.

Capítulo 2

Considerações Sobre os Deslizamentos de Terra

Os capítulos 2, 3 e 4 representam o referencial teórico deste trabalho. Esta revisão bibliográfica visa discorrer algumas considerações sobre o fenômeno de deslizamento de terra, sobre as ferramentas utilizadas para o planejamento urbano e a ocupação de encostas e sobre a elaboração de mapas suscetibilidade a deslizamento de terra. Estes mapas permitem auxiliar o Poder Público no direcionamento de suas ações e intervenções.

Para a definição de áreas suscetíveis a deslizamento de terra torna-se indispensável o conhecimento dos mecanismos que levam ao deslizamento, a distribuição geográfica das informações e caracterizações geotécnicas disponíveis e a existência de formulações matemáticas que propiciem o cálculo do fator de segurança de uma área.

2.1. CARACTERÍSTICAS DO FENÔMENO

Diversos autores, tais como Guidicine e Nieble (1976) e Wolle (1980), descrevem com detalhes vários mecanismos que levam ao deslizamento de taludes, tais como:

1. Diminuição dos parâmetros de resistência por intemperismo;
2. Mudança na geometria da massa terrosa;
3. Elevação do nível piezométrico (nível de água) em massa homogêneas;
4. Elevação da coluna de água em descontinuidades;

5. Rebaixamento rápido do lençol freático;
6. Erosão subterrânea retrogressiva (*piping*);
7. Diminuição do efeito de coesão aparente.

Além dos mecanismos já descritos, Campos (1984) dá ênfase aos deslizamentos causados pelo processo de infiltração de água no subsolo, que provoca uma redução na resistência ao cisalhamento pela perda total ou parcial de sucção. O autor cita alguns exemplos, como os trabalhos de Morgenstern e Matos (1975) e Lumb (1975), que propõem a existência de um mecanismo de deslizamento de taludes de solos residuais onde a instabilização é provocada pela redução da resistência ao cisalhamento do solo, associada a perda de sucção pelo processo de umedecimento.

O subsolo onde está implantada a parte mais ocupada da cidade de Salvador é constituído por solo residual proveniente da decomposição de uma rocha metamórfica de fácies granulito que, devido a grande movimento tectônico ocorrido na região e ao clima quente e úmido, proporcionou a formação de um espesso manto desse solo. O nível de água encontra-se a grande profundidade, as encostas estão geralmente na condição não saturada, o que pode propiciar os deslizamentos de terra provocados pela infiltração de água (CAMPOS, 2002). Este mecanismo também foi evidenciado por Jesus et al (2005a), que analisando os diversos tipos de rupturas ocorridas na cidade de Salvador, afirmam que predominam os deslizamentos superficiais relacionados com o processo de infiltração das águas de chuva ou de esgotamento sanitário, já que os deslizamentos ocorrem com espessura variando entre 2 e 4 metros, enquanto que o nível de água em geral está localizado a uma profundidade superior a 10 metros.

Um trabalho executado no subúrbio ferroviário de Salvador (REDIVO et al, 2003), com a finalidade de se determinar áreas suscetíveis a deslizamentos rasos, concluiu que na região do subúrbio ferroviário os deslizamentos foram fortemente controlados pela topografia. Segundo estes autores os movimentos translacionais representam a forma mais frequente entre todos os tipos de movimentos de massa, tendo as seguintes características: (a) são compridos e rasos e (b) o plano de ruptura geralmente encontra-se em profundidades que variam de 0,5 a 5,0 m, conforme também citado por Fernandes e Amaral (1996).

2.2 INVESTIGAÇÕES GEOTÉCNICAS

O conhecimento dos parâmetros geotécnicos de uma área é obtido geralmente, por meio da execução de investigações geotécnicas, como sondagens de simples reconhecimento e a coleta de amostras para ensaios em laboratório.

2.2.1 Sondagens a percussão com SPT (Standard Penetration Test)

Em muitos países do mundo, mas particularmente no Brasil, os projetos da área geotécnica são executados com base nos resultados obtidos dos ensaios correntemente denominados de SPT (TEIXEIRA, 2003). As sondagens com SPT são investigações geomecânicas diretas que visam determinar: a) a estratigrafia do subsolo, b) a resistência à penetração e c) a posição do lençol freático (ALMEIDA e ALBRECHT, 2002). Estas investigações possuem um custo relativamente baixo (LIMA, 1979).

Em se tratando de áreas urbanas, inúmeras sondagens são executadas, o que as tornam um grande acervo de informações que servem para caracterizar o subsolo de diversas cidades, atendendo assim às diversas finalidades da geologia de engenharia (ALMEIDA e ALBRECHT, 2002).

Os dados obtidos com as sondagens proporcionam informações pontuais, que quando são representadas numa base cartográfica, permitem a sua utilização no planejamento urbano. A recuperação de relatórios de sondagens evita a superposição de trabalhos e dinamiza a alimentação dos dados (ALMEIDA e ALBRECHT, 2002).

2.2.2 Amostras retiradas para ensaios em laboratório

Para o conhecimento das propriedades de resistência do solo, tem-se como opção o processo de amostragem geotécnica. Este visa determinar a composição e a estrutura do solo, propiciando ainda, a obtenção de corpos de prova para a realização de ensaios em laboratório (LIMA, 1979).

Lima (1979) lembra que a viabilidade técnica e econômica da obtenção de amostras indeformadas é uma função da natureza do solo a ser amostrado, da profundidade de coleta da amostra e da presença de nível d'água. Esses fatores determinam o tipo de amostrador e os recursos a utilizar. Estas amostras têm que ser representativas, conservar os constituintes minerais do solo "in situ" e a umidade natural.

A retirada de blocos indeformados permite se obter informações dos solos quanto a sua estrutura, textura, umidade e constituição mineralógica. Permitem também a realização de ensaios geotécnicos em laboratório para obtenção de parâmetros de resistência ao cisalhamento, como ângulo de atrito e coesão. O local de coleta destas amostras deve levar em consideração, dentre outros fatores, além da representatividade, a disposição geográfica e o acesso ao local de amostragem (VIANA et al, 2002).

2.3. MODELAGEM MATEMÁTICA E CÁLCULO DO FATOR DE SEGURANÇA (FS)

Devido à natureza complexa dos movimentos de massa, é difícil se prever a configuração exata do mecanismo de ruptura e do volume a ser deslocado. Entretanto, dependendo das condições do terreno e de algumas suposições analíticas, modelos matemáticos teóricos adequados podem ser produzidos para este tipo de análise (BHATTARAI et al, 2004).

Os modelos matemáticos têm origem nas formulações relacionadas a análise da estabilidade de taludes. As análises baseadas no equilíbrio limite, tais como: talude infinito, Bishop, Fellenius, Spencer, entre outros, são as mais utilizadas atualmente para análise individualizada de uma área. Estas análises consideram que as forças que tendem a induzir a ruptura são balanceadas pelos esforços resistentes. A fim de se comparar à estabilidade de taludes em condições diferentes de equilíbrio limite, definiu-se o fator de segurança (FS) como a resultante das forças solicitantes e resistentes ao deslizamento (GUIDICINE e NIEBLE, 1976; LAIRD, 2001).

Segundo Guidicine e Nieble (1976), a estabilidade de taludes se baseia na relação entre dois tipos de forças, as estabilizantes (resistentes) e as instabilizantes. A razão entre essas duas forças é chamada de fator de segurança. O fator de segurança pode ser calculado para identificar áreas suscetíveis a deslizamento de terra.

$$FS = \frac{\text{Esforços estabilizantes}}{\text{Esforços instabilizantes}} \quad (1)$$

Um fator de segurança menor ou igual a 1 indica a ruptura dos maciços, sendo considerado seguro o talude quando apresenta fator de segurança maior que 1.5 (NBR 11.682, 1991).

A maioria dos modelos matemáticos inclui fatores como ângulo de declividade, distribuição espacial das camadas com os parâmetros dos solos (peso específico,

coesão e ângulo de atrito) e a posição do nível de água do terreno. A influência de um possível acréscimo de resistência pela presença de raízes de plantas pode ser acrescentada de forma independente em alguns modelos ou por um simples ajuste no valor de coesão do solo (LAIRD, 2001).

Em muitas verificações de estabilidade de taludes o desenvolvimento de equações baseadas no conceito de talude infinito é muito frequente, isso se deve por causa de sua relativa simplicidade e por permitir o cálculo automático de índices de estabilidade em áreas extensas (BHATTARAI et al., 2004). Modelos deste tipo são baseados em leis físicas que refletem o fenômeno estudado e permitem que hipóteses específicas sejam testadas, diminuindo assim a subjetividade (GOMES et al, 2005).

Uma formulação matemática para o cálculo de FS, baseada no talude infinito, é apresentada em Savage et al (2004). Na figura 2 o autor descreve de forma simplificada um modelo conceitual para solos em condições saturadas e áreas com declividade.

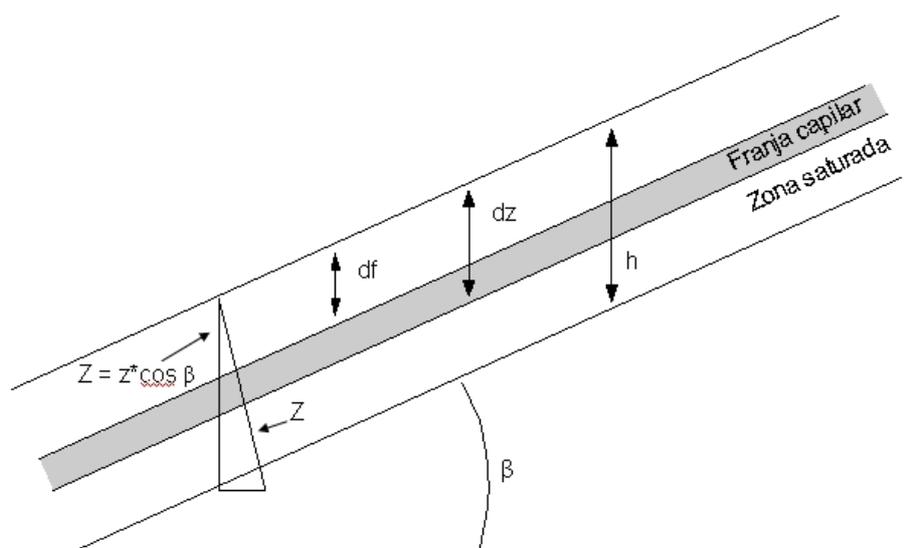


Figura 2 – Representação das condições de umidade em talude infinito (SAVAGE et al,2004)

Neste modelo a condição não saturada ou de solo seco varia até a condição **df** que é interceptada por uma zona de franja capilar. Dentro da zona não saturada se evidencia a presença de poro-pressões negativas. A relação entre o grau de saturação, condutividade hidráulica e poro-pressões possuem um comportamento não-linear. Na franja capilar a poro-pressão é negativa e a condutividade hidráulica é constante. Na zona saturada existe a presença de poro-pressões positivas e a condutividade

hidráulica contínua e constante. Conseqüentemente, o grau de saturação e a condutividade hidráulica são independentes da presença de poro-pressão abaixo da zona não saturada. Neste modelo a camada mais profunda h é admitida como sendo a região do impenetrável.

O FS pode ser cálculo, a partir da definição acima, por meio da resolução da seguinte fórmula:

$$FS = \frac{c - \psi \gamma_w \tan \phi}{\gamma_s * h * \text{sen} \beta \cdot \cos \beta} + \frac{\tan \phi}{\tan \beta} \quad (2)$$

Onde,

γ_s - peso específico do solo saturado

γ_w - peso específico do solo não saturado

Ψ - razão entre a poro-pressão e peso específico da água

h – profundidade da superfície de ruptura

β - ângulo de declividade

Φ - ângulo de atrito

c - coesão do solo

Para uma região onde a presença do nível de água encontra-se abaixo da superfície de ruptura, pode-se adaptar a equação (2) para:

$$FS = \frac{c}{\gamma * h * \text{sen} \beta \cdot \cos \beta} + \frac{\tan \phi}{\tan \beta} \quad (3)$$

Onde,

γ - peso específico do solo

Para o caso em que a frente de saturação esteja numa profundidade superior a da superfície de ruptura, os parâmetros de resistência ao cisalhamento devem ser obtidos de ensaios em amostras previamente inundadas ou saturadas.

Capítulo 3

Ferramentas de Planejamento Urbano para Ocupação em Encostas

O crescimento urbano acelerado vem promovendo constantes alterações nas cidades. Estas alterações desordenadas acarretam a ocupação populacional em áreas de encostas. A cartografia geotécnica e sua interrelação com os sistemas de informações geográficas, a criação de um banco de dados e a elaboração de análises geográficas são ferramentas importantes no planejamento urbano.

Como resultado desta inter-relação, têm-se como produto, para o planejamento da ocupação de encostas, a elaboração de um mapa de suscetibilidade a deslizamento de terra. O capítulo 4 trata especificamente sobre as possibilidades de elaboração deste mapa.

3.1. CONSIDERAÇÕES SOBRE CARTOGRAFIA GEOTÉCNICA

Genericamente podemos dizer que a cartografia geotécnica é uma representação gráfica, sob a forma de mapa ou carta geotécnica, das limitações e potencialidades do meio físico, na qual são avaliados todos os componentes de um ambiente geológico de particular interesse para o planejamento, projeto e construção civil (BARROS, 1996; DINIZ, 1998; ZUQUETTE, 1981 citado por WOLSKI et al, 1998).

Ao se analisar um mapa ou uma carta, verifica-se que existem objetos identificados e classificados, onde a identificação é o ato de reconhecer o objeto e a classificação

envolve uma análise interpretativa da preposição, que são colocados de maneira afirmativa ou negativa, correlacionados com características do objeto em questão (ZUQUETTE, 1987).

O processo de construção de um mapa geotécnico obedece ao princípio básico de traçar linhas ao redor de porções do meio físico, homogêneas frente a um determinado grupo de atributos, delimitando áreas com características favoráveis ou desfavoráveis ao uso e ocupação, e tendo como função básica a transmissão de informações para serem usadas nas mais diversas situações de engenharia ou planejamento, inclusive criar subsídios para os Planos Diretores Municipais (TEIXEIRA, 2003; ZUQUETTE, 1987).

Observa-se que as áreas delimitadas em um mapa, de maneira homogênea ou com heterogeneidade aceitável em relação aos atributos considerados, são devidas a uma classificação lógica em razão das finalidades do trabalho, e a partir desta situação necessita-se conhecer métodos e sistemáticas de classificação. A classificação de qualquer atributo é sempre realizada em função da natureza e da finalidade exigida pelo executor, podendo ser uma classificação natural e/ou artificial. Classificação natural é aquela baseada nas estruturas, propriedades e atributos dos materiais em investigação; e a classificação artificial é baseada numa finalidade prática a que se propõe o mapeamento em termos de manejo dos materiais, economia de tempo (no mapeamento) e energia (em termos de custo) (ZUQUETTE, 1987).

A cartografia geotécnica tem servido como ferramenta para ajudar a definir e fiscalizar a ocupação territorial das regiões, sobretudo no que se diz respeito à ordenação dos espaços geográficos, de uma maneira ajustada tecnicamente, respeitando as áreas de interesse ambiental e as condições necessárias para que a população desfrute-as sem alterar as condições básicas de vida. (BARROS, 1996; ZUQUETTE, 1987).

Zuquette (1987) também cita o exemplo da Espanha como evidência da importância da cartografia geotécnica como ferramenta de planejamento territorial. Por volta dos anos 50, teve início a elaboração da cartografia geotécnica da Espanha, onde se definiu a cartografia como fator primordial no desenvolvimento territorial, industrial e urbano. Desta forma a partir da análise sistemática de 17 países, desenvolveu-se uma metodologia considerada mais adequada para a Espanha.

Segundo Dearman (1991) a cartografia geotécnica é usualmente motivada por um propósito relacionado à engenharia civil, tais como o planejamento do uso da terra em

ambientes urbanos, o acesso a distribuição de materiais para a construção, dentre outros.

A variedade de produtos que podem ser gerados pela cartografia geotécnica implica na utilização de várias metodologias. Estas metodologias foram desenvolvidas e aplicadas em várias regiões, dentre elas destacam-se metodologias já consagradas em outros países como a IAEG (Associação Internacional de Geologia de Engenharia), PUCE (Padrão, Unidade, Componente e Avaliação) e Matula, bem como a metodologia desenvolvida e proposta pela Escola de Engenharia de São Carlos / USP (EESC/USP) (BARROS, 1996).

Dentre todas as metodologias e sistemas existentes para a orientação da ocupação do meio físico, alguns são relativos ao processo de mapeamento geotécnico, outros referem-se a realização de mapas para a adequada ocupação dos terrenos. Mesmo enfocando uma situação particular, o produto final também reflete um mapa geotécnico especial (ZUQUETTE, 1987).

Zuquette (1987) indica a possibilidade de se desenvolver mapas geotécnicos chamados de seletivos. Este mapeamento é realizado em escalas grandes e retrata zoneamentos confiáveis em termos das características analisadas como por exemplo, a elaboração de um mapa sobre a capacidade de carga de uma área. Os mapas geotécnicos seletivos são realizados para auxiliar em obras de infra-estrutura (estradas, drenagens e escavações), construções residenciais e industriais. Normalmente são usadas por planejadores, engenheiros, arquitetos e outros profissionais ligados à ocupação do meio físico. Barros (1996) apresenta vários outros tipos de análises que podem ser apresentadas como mapas geotécnicos seletivos. São eles:

1. Mapa de proteção de recursos naturais incluindo água subterrânea;
2. Mapa de planejamento regional, uso e ocupação das terras e construção;
3. Mapa de áreas de risco, de modo a definir áreas potencialmente instáveis, estabelecer um sistema de prevenção e monitoramento geotécnico adequado;
4. Mapa de ambientes geológicos vulneráveis propensos a mudanças indesejáveis causadas por eventuais obras.

Uma análise específica e direta de um mapeamento geotécnico pode ser a elaboração de um mapa para fundações. O objetivo primordial na elaboração deste mapa é orientar adequadamente a investigação de fundações, resultando em redução de custo, tempo e alternativas de estudos. Eventualmente, em função do tipo de solo e

posição do lençol freático, é possível, por exemplo, preconizar um determinado tipo de fundação, no nível de fundações diretas ou profundas. Vale lembrar que a elaboração deste tipo de mapa tem o caráter essencialmente orientativo, não substituindo estudos detalhados ao nível de campo (TEIXEIRA, 2003; BARROS, 1996).

Matula (1978) citado por Barros (1996) acha conveniente, tanto do ponto de vista técnico como econômico, levar-se em consideração alguns princípios quando da elaboração de um mapeamento geotécnico: (1) Obter previamente um conjunto de dados geotécnicos, (2) checar a existência de um mapeamento regional e (3) obter informações por meio de um banco de dados. Estas recomendações permitirão a elaboração de mapas de usos múltiplos sintéticos e detalhados de uma determinada região.

Deve-se considerar o mapa geotécnico como um documento temporário e suscetível a ser enriquecido por outras informações após a sua realização. Todos os documentos que lhe serviram de base devem ser arquivados para que, no futuro, possa-se deles fazer uso na restituição de pontos para solucionar possíveis dúvidas (ZUQUETTE, 1987).

Embora a ciência de “fazer mapas” seja relativamente antiga, o modo mais eficiente de fazê-lo, por meio de computadores, é muito recente e hoje se constitui no processo cartográfico globalmente aceito porque alia a facilidade e a produtividade aos clássicos preceitos de boa visualização, entendimento, interpretação e memorização das mensagens de qualquer mapa, especialmente os temáticos (TEIXEIRA, 2003).

Um trabalho de zoneamento do espaço físico em cartografia geotécnica é uma tarefa adequada para a utilização de sistemas de informações geográficas (SIG), posto que a implementação de uma estrutura de banco de dados, considerando uma plataforma de gerenciamento das informações, é uma tarefa importante (TEIXEIRA, 2003).

A linha de pesquisa em cartografia geotécnica enfrenta o desafio da incorporação das atuais tecnologias de análise espacial a sua estrutura de trabalho. A utilização de sistemas computadorizados para o mapeamento geotécnico pode ser de grande importância, especialmente quando se trabalha com mapeamento de grandes áreas ou em áreas em que o volume de informações dificulta a análise por processos não-computacionais. As informações provenientes dos levantamentos podem ser armazenadas em computador e tratadas com o objetivo de gerar informações derivadas que possam contribuir ao planejamento do meio físico e à tomada de decisões (WOLSKI et al, 1998).

A geração de análises, a partir do gerenciamento de uma base de dados geotécnicos, é seguramente a maior contribuição que os sistemas de informação podem trazer a cartografia geotécnica (WOLSKI et al, 1998).

Higashi et al (2002) afirmam que caracterizar geotecnicamente uma determinada área através de mapas, tem sido uma tarefa árdua para muitos pesquisadores. Em função disso, surgiu-se a necessidade de transformar mapas ou cartas em papel para o meio digital, com o objetivo de facilitar o acesso a informações referentes aos dados. Quando estes são empregados nos sistemas de informações geográficas, os resultados de ensaios geotécnicos de laboratório devem estar georreferenciados em relação a sua amostragem, essa é a condição necessária para serem inseridos neste tipo de sistema de informações.

O rigor na localização geográfica não é uma grande exigência em trabalhos de zoneamento geotécnico, posto que a indicação de favorabilidade de uso dos recursos naturais não é precisamente detalhada. Apesar disto, a necessidade de gerenciamento das informações remete automaticamente também a necessidade de gerenciamento das informações cartográficas coerentes, pois é muito freqüente que áreas vizinhas tenham sido mapeadas em épocas distintas, usando sistemas de referência de precisão diferentes (TEIXEIRA, 2003). O rigor cartográfico destes levantamentos deve ser compatível com a incerteza posicional de suas amostras, e o nível de incerteza deverá ser adequada para que o trabalho seja realizado.

3.2. SISTEMAS DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS (SIG) E ANÁLISE ESPACIAL

O SIG veio ocupar um espaço de importância no que diz respeito ao tratamento e análise de dados com características geográficas, ou seja, georreferenciados. Estes sistemas permitem que informações geográficas sejam armazenadas sob a forma de banco de dados, e, também permitem que dados geográficos sejam manipulados e tratados, como por exemplo, na elaboração de um modelo numérico de terreno a partir de uma base cartográfica que contenha curvas de nível.

3.2.1. Banco de dados em mapeamento geotécnico

Uma definição genérica de banco de dados pode ser a de uma ferramenta para armazenamento de informação, sem levar em conta outros aspectos relativos a ciência da computação. Assim, banco de dados é um método moderno de armazenamento e tratamento das informações ou um certo número de arquivos

referentes a uma determinada área de aplicação ou ainda um conjunto de aplicações circundando um conjunto de dados (BASTOS e ZUQUETTE, 2002).

Pode-se também considerar um banco de dados como sendo um conjunto de informações que estão relacionadas a um tópico ou propósito em particular (VALENTE, 2000). As informações devem estar estruturadas sob a forma de tabelas, que possuem alguma ou nenhuma inter-relação lógica, e são gerenciadas por um aplicativo denominado sistema de gerenciamento de banco de dados (SGBD).

Zuquette (1987) já alertava para a diversidade de informações que a geotecnia deveria tratar, juntamente com a dinâmica relacionada às transformações do espaço geográfico e a interação do homem com o ambiente urbano. A ferramenta mais apropriada para auxiliar à gestão destes dados seria o desenvolvimento de um sistema de banco de dados, conforme foi observado pelo autor.

“O ambiente geológico (meio físico) pode sofrer alterações antropogênicas, principalmente devido aos diversos fatores que provém do crescimento populacional e de suas necessidades, tais como mineração, água, construção civil, etc. Qualquer que seja a mudança, sempre haverá variações na paisagem e existirá uma relação entre o homem e o meio físico, conseqüentemente envolvendo os seus atributos e exigindo o conhecimento da interação entre a geotecnia e o “ambiente”. Por ser muito grande o número de situações a serem analisadas, exige-se uma ferramenta que seja tridimensional e multiobjetiva. Essa necessidade permitiu a evolução dos mapas geotécnicos que se caracterizam como a melhor ferramenta em termos de interações entre a geologia, a mecânica dos solos, a hidrologia e as outras ciências, tornando possível à análise global do meio físico. Devido à diversidade dos dados existentes, a avaliação e a classificação é mais complexa que a investigação local, e o melhor auxílio no sentido de estocar e restaurar dados, é o banco de dados computadorizado.”

Dados sobre engenharia geotécnica, formação do solo, propriedades físicas e propriedades para engenharia são de grande importância. A medida que esses dados são obtidos, o gerenciamento e interpretação são processos muito importantes e não são tarefas simples. Os sistemas de banco de dados podem ser considerados como a espinha dorsal de qualquer estudo geotécnico (SUWANWIWATTANA et al, 2001).

O uso amplo e bem organizado de um banco de dados geotécnico, além de auxiliar o mapeamento sobre os principais componentes do meio físico, permite também preparar subseqüentemente, documentos geotécnicos específicos, economizando desta forma, recursos financeiros no momento em que, eventuais trabalhos de campo, podem ser cancelados (BARROS, 1996).

Além de armazenamento de informações, os sistemas de banco de dados possuem algumas vantagens como permitir a independência, controlar a redundância, garantir a integridade, favorecer a privacidade e fornecer a segurança dos dados, bem como, facilitar a criação de novas aplicações, fazer um controle automático de conexão entre as tabelas e otimizar o espaço de armazenamento das informações (BASTOS e ZUQUETTE, 2002).

Zuquette (1987) também alerta que os bancos de dados representam um grande avanço na elaboração dos mapeamentos geotécnicos, todavia, para a sua implementação exige-se um direcionamento dos órgãos públicos ou privados.

3.2.2. Sistemas de informações geográficas (SIG)

Pode-se considerar o SIG como um conjunto de ferramentas para coleta, armazenamento e recuperação de dados espaciais do mundo real (BURROUGH, 1986), ou também, como um conjunto de procedimentos, manual ou informatizado, utilizado para armazenar e tratar dados geograficamente referenciados (ARONOFF, 1989). Segundo Fortes (1998), para todas as definições de SIG fica evidente que estes sistemas tratam informações geográficas, sendo que, esta ênfase no dado geográfico é o que diferencia o SIG de outros sistemas computacionais.

O SIG necessita usar o meio digital, portanto, o uso intensivo da informática é imprescindível. Deve existir uma base de dados integrada, com funções de análises que variem de álgebra cumulativa (operações aritméticas) até álgebra não-cumulativa (operações lógicas). Este tipo de sistema une uma base espacial de referência e suas informações em torno de uma entidade espacial particular do mapa. A informação geográfica é armazenada como entidade de um objeto geograficamente representado (MENDES e CIRILO, 2001 e SILVA, 2003).

Dentre as tecnologias disponíveis, o SIG é a ferramenta ideal para modelar deslizamentos de terra em função de sua versatilidade em processar uma grande quantidade de dados, criando um ambiente para a análise e visualização dos resultados através de ferramentas eficazes na representação de dados espaciais

referentes ao mundo real. Ele também possui uma característica única, que consiste na habilidade de se trabalhar com uma variedade de coordenadas geográficas e de se incorporar modelos matemáticos de engenharia apropriados para determinadas tarefas. Esta condição tem causado a proliferação de aplicações através de uma gama de setores da engenharia, especialmente a engenharia civil, onde, gerenciar dados com características geográficas é essencial para análises do espaço (SIVAKUMAR BABU e MUKESH, 2002).

A condição inicial para o uso de um SIG em geotecnia diz respeito ao georreferenciamento dos resultados de ensaios geotécnicos realizados em laboratórios (HIGASHI et al, 2002).

Para Suwanwiwattana et al (2001), a construção de um sistema de informações geotécnicas pode ser dividido em duas partes principais. A primeira é o desenvolvimento de um sistema de banco de dados para armazenar e gerenciar os parâmetros geotécnicos (solo e rocha). A segunda é a modelagem e visualização destas informações por uma ferramenta SIG através da modelagem matemática.

3.2.3. Topografia e modelo numérico de terreno (MNT)

A topografia de determinada região pode ser representada por modelos numéricos de terreno ou simplesmente MNT (figura 3). Estes modelos são, na sua maioria, estruturas matriciais na forma de um grid regular de variações contínuas do relevo. Apesar do MNT representar uma forma contínua do relevo, ele é obtido através de um conjunto de valores discretizados de elevações, como curvas de nível e/ou pontos cotados (BURROUGH, 1986).

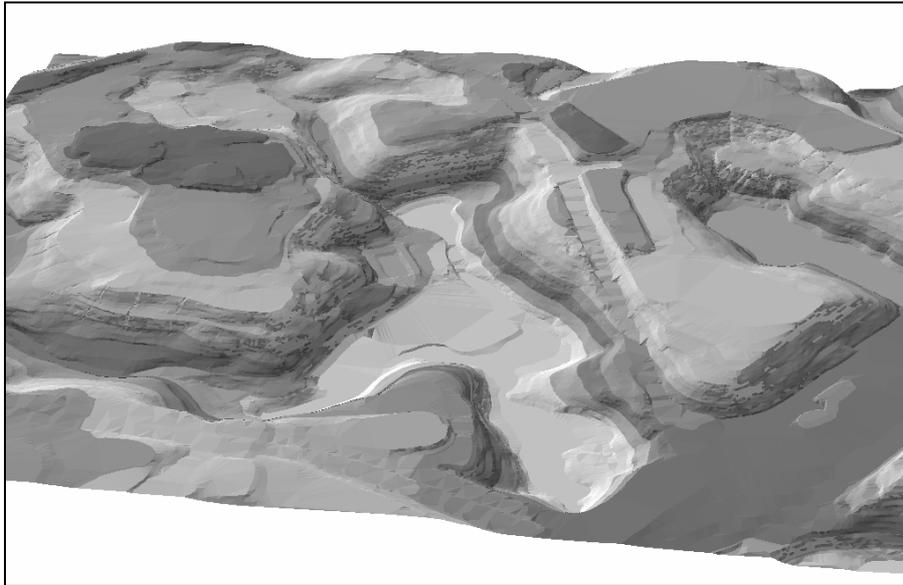


Figura 3 – Exemplo de uma representação gráfica de um MNT da região de Vila Nova de Pituáçu na Av. Paralela.

Estas elevações digitais são normalmente organizadas sob a forma de uma entre três estruturas de dados possíveis (figura 4): (1) grid regular, (2) redes de triângulos irregulares (TIN), e (3) linhas de contorno. Estes são dependentes da fonte de dados e/ou do método de análise preferido (WILSON e GALLANT, 2000).

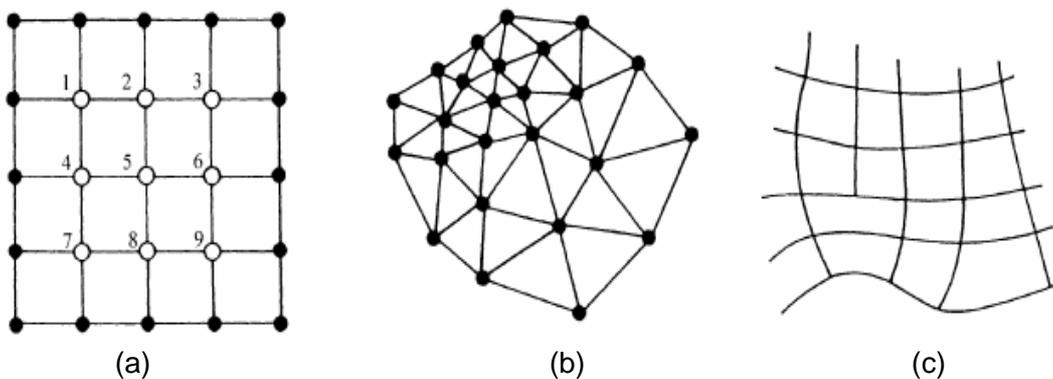


Figura 4 – Modelo de grid regular (a), rede de triângulos irregulares (b) e linhas de contorno (c) (Fonte: WILSON e GALLANT, 2000).

Os MNTs têm sido comumente representados sob a forma de um grid quadrado (WILSON e GALLANT, 2000), isto se deve pelo fato desta estrutura ser uma matriz simples que armazena em suas posições $M_{i,j}$ valores de elevação (topografia) e também por que estruturas matriciais são computacionalmente de fácil implementação.

O processo de geração de um MNT pode ser dividido em três etapas: aquisição das amostras ou amostragem, geração do modelo propriamente dito ou modelagem e, finalmente, os modelos utilizados (interpolação) (FELGUEIRAS, 2001).

A modelagem envolve o processo de criação da estrutura de dados (grid regular, rede triangular ou linhas de contorno) e a definição da superfície de ajuste para os elementos dessa estrutura. Os modelos utilizados podem ser globais ou locais. Os globais são definidos por uma função que utiliza todos os elementos do conjunto de amostras. Os locais utilizam funções cujos coeficientes são definidos por elementos amostrais escolhidos dentro de uma região local de interesse (as regiões podem ser definidas por raios de influência ou por quantidade de amostras vizinhas) (FELGUEIRAS, 2001).

A escolha do método de interpolação adequado, bem como a qualidade dos dados utilizados na interpolação é fundamental para a confecção do MNT. Quanto maior for a confiabilidade e o detalhamento do modelo, maior será a precisão do mapa de declividade (REDIVO et al, 2003).

Os MNTs possuem três informações espaciais para cada célula da matriz: (a) ângulo de declividade, (b) ângulo de aspecto e (c) o valor referente à posição altimétrica, altitude ou cota (CHUNG e FABRI, 2002). A declividade fornece a medida de inclinação (em graus ou percentual) do relevo em relação ao plano horizontal (SCOTTON et al, 2004).

A partir do MNT também se podem obter outros tipos de mapas, tais como, o mapa das linhas de fluxo gravitacional. Estas linhas são vetores que representam as direções de fluxo da água que caem em determinada célula. Segundo Dias et al (2004) quando há um evento de chuva, a água que cai em cada célula irá escoar para uma determinada direção, que será a direção da linha de maior declividade do terreno. A direção de fluxo determina a direção de maior declividade de uma célula em relação às suas células vizinhas.

O fluxo gravitacional representa a linha de maior declividade do terreno, quando da ocorrência de um regime de chuvas intenso, estas linhas representam o caminho preferencial de águas pluviais (CAMPOS et al, 2005).

Capítulo 4

Mapa de Suscetibilidade a Deslizamento

Na engenharia, uma das formas de se quantificar o risco da suscetibilidade a deslizamento de terra é através do cálculo do fator de segurança de uma área. Outras metodologias, quantitativas ou qualitativas, também podem ser empregadas na elaboração de um mapa de suscetibilidade.

A definição de áreas suscetíveis a deslizamento é de extrema importância porque permite a identificação e delimitação de áreas com maior ou menor potencial a sofrer ação do fenômeno de deslizamento, e, conseqüentemente definir a priorização de áreas propensas à realização de obras de contenção (GOMES et al, 2005). Zhou et al (2003) mostra o exemplo do Japão, onde a identificação do zoneamento de áreas potencialmente suscetíveis a deslizamento tem se tornado há algum tempo, um importante mecanismo de mitigação, permitindo assim, o desenvolvimento de planos de ação que têm sido adotados como ações complementares ao planejamento.

4.1. DEFINIÇÃO DE MAPA DE SUSCETIBILIDADE

Quanto maior o conhecimento sobre os mecanismos que levam a ocorrência de deslizamentos de terra, maior a chance de se definir de modo correto áreas de suscetibilidade a deslizamento. Estas são definidas como o potencial de ocorrência de um fenômeno de destruição num determinado período de tempo e numa determinada região. O zoneamento destas áreas está relacionado com a divisão de porções de terra, de características homogêneas ou domínios homogêneos, de acordo com o grau

de potencial de risco atual (VARNES, 1984 citado por SIVAKUMAR BABU e MUKESH, 2002).

Os mapas de suscetibilidade a deslizamentos se referem a divisão da terra em setores de encostas com variação do grau de estabilidade, baseando-se na significância dos fatores que induzem a instabilidade (FOUMELIS, 2004). Foumelis et al (2004) citando vários autores definem que os mapas de suscetibilidade a deslizamento também devem ser examinados como a probabilidade que um fenômeno de deslizamento ocorra sob determinadas condições de terreno, levando-se em consideração a escala de tempo (tempo de recorrência) e um tipo particular de deslizamento.

A idéia principal é que a relação estatística entre os deslizamentos que ocorreram no passado e as variáveis que condicionaram estes deslizamentos, podem ser usadas para desenvolver mapas de suscetibilidade a deslizamentos (REMONDO et al, 2005).

Sabe-se que estes tipos de mapas procuram refletir o complexo conhecimento sobre os movimentos de massa e seus fatores condicionantes (AYALEW et al, 2005). Segundo Guzzetti et al (1999) citado por Ayalew et al (2005), o mapeamento de áreas que não estão sujeitas a deslizamentos se baseia na suposição que futuros deslizamentos ocorrerão sob condições similares aos observados no passado (retroanálise).

A distribuição espacial das variáveis que servem na análise para a elaboração do mapa de suscetibilidade de uma área, determina a distribuição espacial da suscetibilidade a deslizamento da região (CARRARA et al, 1995 citado por FOUMELIS et al, 2004).

Um exemplo deste tipo de mapa é apresentado no relatório técnico Programa Serra do Mar – Carta Geotécnica da Serra do Mar nas Folhas de Santos e Riacho Grande, elaborado em 1988 pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT). No que concerne aos movimentos de massa, este documento, através do cruzamento de dados atualizados, caracteriza e orienta a intervenção antrópica no setor da Serra do Mar, relativa ao território paulista. A carta identifica e caracteriza os principais processos associados à dinâmica superficial da área, considerando três grandes eixos: condicionantes do meio físico às estabilidades das vertentes; representação cartográfica dos depósitos de tálus e paredes rochosas; e análise qualitativa das bacias de drenagem quanto à potencialidade de geração de corridas de massa (BERTAGNA e RIEDEL, 1999).

A classificação detalhada dos mapas de suscetibilidade é um tanto subjetiva e depende da escolha dos principais aspectos que deverão ser enfatizados. Especialistas e planejadores estão cada vez mais conscientes da importância em tentar prever onde, como e porque os deslizamentos de terra ocorrerão numa determinada área. Para isso diferentes abordagens em relação a suscetibilidade a deslizamento foram desenvolvidas nos anos recentes (ALEOTTI e CHOWDHURY, 1999).

4.2. MÉTODOS DE ELABORAÇÃO

Mapas de áreas suscetíveis a deslizamento têm sido construídos através de várias metodologias, tais como, (a) inventários; (b) levando-se em conta as condições de determinada região, incluindo geologia, hidrologia, topografia, e/ou geomorfologia; (c) através de correlação estatística de frequência de deslizamentos com fatores geológicos e geomorfológicos; (d) usando-se a análise de fatores de segurança na análise de estabilidade (SIVAKUMAR BABU e MUKESH, 2002, CLERICI, 2002). Estas previsões se baseiam na correlação que as condições que levaram a ocorrência de retroanálise de deslizamentos no passado, podem afetar, através da avaliação de similaridade entre áreas, locais que normalmente estão livres de deslizamentos (CLERICI, 2002).

Uma hipótese implícita é que comportamentos passados sobre o processo de movimento de massa e seus efeitos nos elementos humanos, podem ser usado para derivar, com relacionamentos estatísticos, modelos que podem ser usados para prever a probabilidade da ocorrência de deslizamentos de terra no futuro (REMONDO et al, 2005).

No trabalho de Aleotti e Chowdhury (1999) pode-se encontrar a descrição de vários métodos para a elaboração de um mapa de suscetibilidade. Os autores definem uma subdivisão inicial entre os métodos qualitativos e quantitativos. Os qualitativos se baseiam no conhecimento acumulado em determinada região, em relação as diferentes características de instabilidade, determinadas diretamente por meio de visitas a campo ou pela combinação de diferentes mapas índices. Os quantitativos se distinguem entre as análises estatísticas e métodos determinísticos que envolvem análises baseadas em modelos matemáticos de geo-engenharia. A abordagem quantitativa é formalmente mais rigorosa que a qualitativa.

Os métodos qualitativos são menos rigorosos porque levam em consideração o julgamento técnico e pessoal na definição de áreas propensas a deslizamento, onde, a

maior limitação destes métodos diz respeito ao grau de subjetividade relacionado com o processo de se atribuir diferentes pesos aos vários fatores que governam os princípios relacionados com a instabilidade de taludes (ALEOTTI E CHOWDHURY,1999).

Nos métodos quantitativos se destacam as vantagens da aplicação de modelos determinísticos em estudos de suscetibilidade a deslizamento, pois estes modelos se baseiam em modelos físicos. Modelos de estabilidade, como os usados em engenharia geotécnica, calculam a estabilidade de um talude, usando parâmetros como coesão, ângulo de atrito e poro-pressões. Como resultado obtém-se o cálculo fator de segurança (FS). Modelos de estabilidade determinísticos têm sido utilizados desde o começo do século passado para o cálculo de estabilidade de taludes individuais. Somente recentemente os pesquisadores começaram a utilizar estes modelos para o cálculo de mapas de estabilidade de taludes para grandes áreas como bacias de captação (VAN WESTEN, 2000).

O cálculo do fator de segurança requer a presença de dados sobre a geometria do terreno, dados sobre os parâmetros de resistência ao cisalhamento (coesão e ângulo de atrito) e informações referentes as poro-pressões. As principais propriedades físicas são quantificadas e aplicadas em modelos matemáticos que permitem o cálculo do FS. Esta abordagem é amplamente usada na engenharia civil e engenharia geológica, e, têm sido aplicadas na definição e mapeamento de áreas potenciais a deslizamento, principalmente após a introdução do sistema de informações geográficas neste contexto de análise (ALEOTTI e CHOWDHURY, 1999, GOMES et al, 2005).

O uso do SIG facilitou o desenvolvimento de simulações de múltiplos cenários baseados em hipóteses variáveis sobre os fatores que desencadeiam o deslizamento de terra, bem como, a construção de mapas de suscetibilidade confiáveis (ALEOTTI e CHOWDHURY, 1999).

Outros métodos determinísticos utilizados são os métodos estatísticos. Estes analisam a relação entre a ocorrência de deslizamentos e os fatores relacionados (profundidade do solo, resistência do solo, ângulo de declividade, vegetação, dentre outros) e criam um índice de avaliação integrada para uma área modelo. Após isso, estes índices de predição de deslizamentos são extrapolados para áreas vizinhas (ZHOU et al, 2003).

Van Westen (2000) cita que outros autores, como Bonham-Carter (1994), estão usando lógica fuzzy ou aproximações Bayesianas ao problema de combinar série de

dados para a elaboração de mapas suscetibilidade a deslizamentos. O trabalho de Aleotti e Chowdhury (1999) apresenta também a utilização de uma metodologia baseada no uso de redes neurais.

Vale ressaltar que a saída convencional de um modelo de definição de áreas potenciais ao deslizamento de terra é um mapa contendo a distribuição de índices de suscetibilidade a este fenômeno. A utilização destes modelos tem apresentado viabilidade em sua execução, encorajando modeladores a aplicar e desenvolver modelos para definir áreas de risco a deslizamentos para regiões tropicais, que geralmente não são contemplados nos sistemas de informações avançados (ZAITCHIK e VAN ES, 2003).

Capítulo 5

Material e Métodos

Serão descritas a seguir a caracterização e definição da área de estudo, bem como, os procedimentos envolvidos na aplicação do modelo matemático que permitiu delimitar áreas suscetíveis a deslizamentos de terra.

5.1. ÁREA DE ESTUDO

Para a execução da metodologia proposta neste capítulo, se escolheu uma área da cidade de Salvador que possui predisposição a deflagração do fenômeno de deslizamento de terra.

5.1.1. Localização e justificativa

A área na qual desenvolveu-se o estudo tem 1,38 km² ou 1.380.000 m² e está localizada na região do bairro do Engenho Velho de Brotas, correspondendo a uma parte da Região Administrativa nº 5 - Brotas, próximo ao Dique do Tororó (figura 5). A escolha dessa área deveu-se pelos seguintes fatores:

- Segundo dados coletados pela defesa civil, entre os anos de 1994 e 2004, evidenciou-se um total de 1.044 áreas com ameaça de deslizamento e 1.667 áreas onde ocorreram deslizamentos de terra dentro da área de estudo;

- O relatório de dezembro de 1996 do Grupo de Estudos Técnicos das Áreas de Risco de Encostas de Salvador (PMS, 1996) relatou a presença de focos de risco na área;
- O estudo executado pela OCEPLAN (1981) apresentou mapas de ocorrências de deslizamentos registrados e de áreas de risco confirmando o potencial de estudo da área proposta.

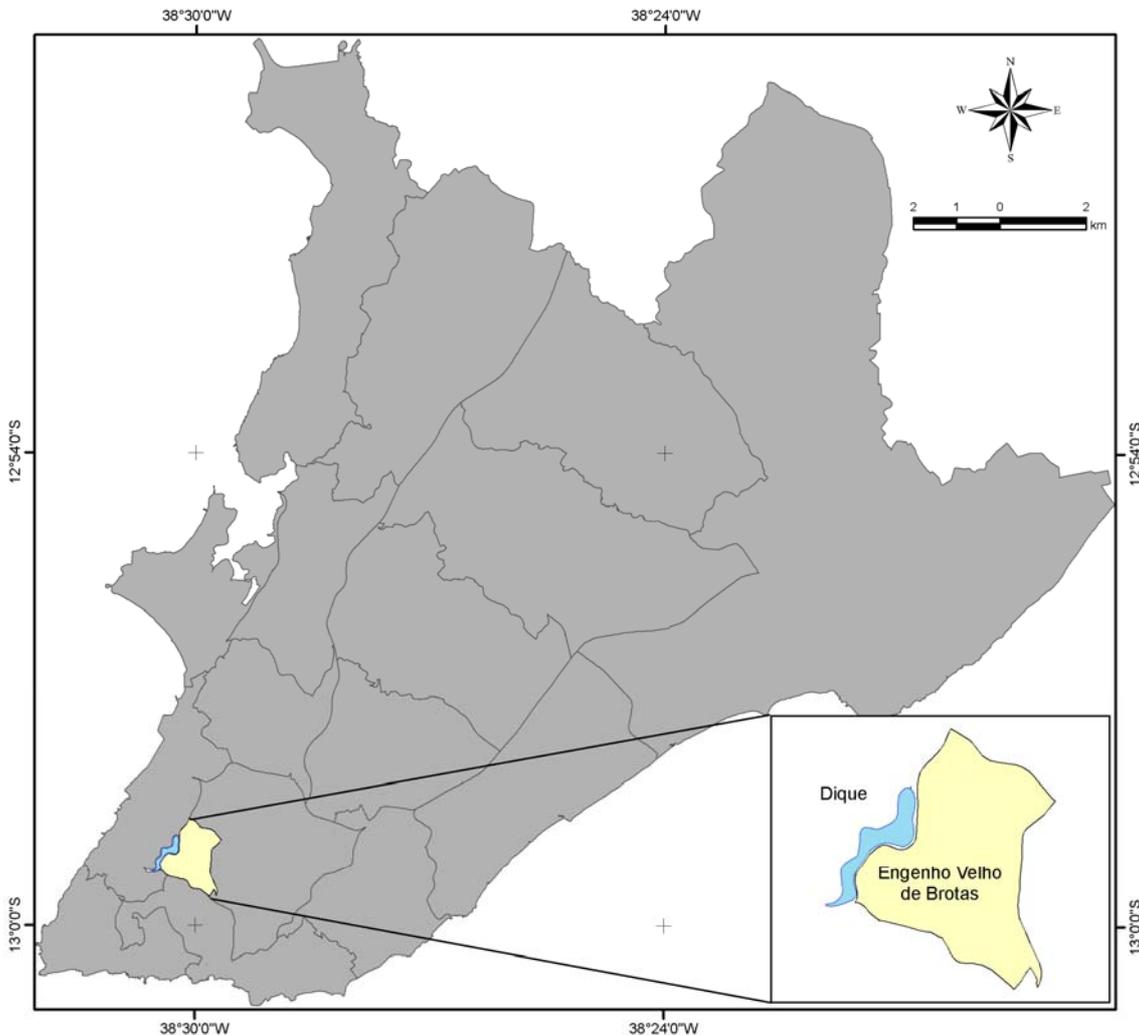


Figura 5 - Localização da área de estudo em Salvador – BA.

5.1.2. Caracterização da área

Ribeiro (1991) descreveu a geologia da cidade de Salvador como sendo constituída por duas partes distintas divididas pela escarpa da linha de falha de Salvador. Na cidade baixa afloram os sedimentos da formação Ilhas, membro superior constituído de aglomerados de siltitos e folhelhos. Enquanto na cidade alta, afloram rochas de alto

grau de metamorfismo da fácies granulito, que constituem o embasamento cristalino, além também da presença da formação Barreiras.

Segundo Peixoto (1968) citado por Fernandes da Silva (1994) Salvador é caracterizada por uma morfogênese típica de clima quente e úmido, onde a agressividade do clima provocou a formação de um intenso manto de intemperismo químico, dando origem a um espesso manto residual. Processos erosivos originaram vales relativamente profundos, formando espigões e topos planos, cujas encostas geralmente convexas formam ângulos acentuados com os vales aluviais.

A área em estudo se apresenta inserida na parte leste da falha de Salvador, compreendendo o embasamento cristalino constituído por rochas de alto grau de metamorfismo (FERNANDES DA SILVA, 1994). Sob estas rochas repousa a formação Barreiras nas partes mais elevadas e nos vales existem a predisposição do acúmulo do que se pode chamar de terras úmidas.

Topograficamente a área apresenta variações de 14 a 71 metros (figura 8) de altitude. As maiores altitudes encontram-se distribuídas na porção central da área, formando uma estrutura com direção preferencial nordeste – sudoeste. As encostas bordejam os limites da área e apresentam de sete a oito vales encaixados, provenientes da ação de um processo de erosão diferencial.

Os maiores ângulos de declividade variam entre 30 e 62° (figura 9). As declividades acima de 30° apresentam risco de deslizamentos mais freqüente, sendo que, acima de 60° o regolito é menos espesso e, teoricamente, diminui o risco de escorregamentos. No entanto, fenômenos desse tipo foram verificados em áreas cujo manto de regolito era pouco espesso (SMA, 1990).

5.1.3. Base cartográfica

Os arquivos da base cartográfica foram obtidos pelo convênio entre a UFBA e a PMS (Mattos et al, 2005a). Esta base faz parte do acervo cartográfico da CONDER para a escala de 1:2.000 e possui as seguintes características cartográficas: projeção Universal Transversa de Mercator (UTM), datum planimétrico SAD69, datum altimétrico em Imbituba – SC, articulação cartográfica padrão SICAR e ano de referência da informação de 1992. Estes dados foram obtidos conforme consulta realizada ao Sistema de Informações Geográficas Urbanas do Estado da Bahia (INFORMS), na homepage da CONDER (<http://www.conder.ba.gov.br/informs/>), na data 14 de janeiro de 2006.

A área de estudo deste trabalho o coberto por um total de 9 folhas topográficas em escala 1:2.000 que obedecem a codificação imposta pelo sistema cartográfico INFORMS / CONDER. As folhas trabalhadas foram: 149260, 149420, 149430, 149450, 149460, 150140, 150310, 150340 e 156220. Destas folhas foram trabalhados os temas de edificações, hidrografia, meio-fio e curvas de nível (figura 6).

Estas folhas topográficas encontram-se sob a forma de arquivos CAD (*Computer Aided Design*). Todos os temas ou planos de informação que compõem uma folha encontravam-se disseminados e subdivididos em camadas (*layers*).

Cada informação contida nas camadas dos arquivos foi catalogada. Toda informação que compõe, o domínio de dados necessário para este trabalho, foi convertida para arquivos em formato *ESRI shapefile*. Gerando assim um único arquivo *shapefile* que representasse os temas citados acima.

O arquivo contendo todas as curvas de nível da área serviu de entrada para a elaboração do modelo numérico de terreno (MNT). Os dados referentes aos valores de cota que foram atribuídos a cada linha foram checados para evitar inconsistências na geração do MNT.



Figura 6- Base cartográfica da área de estudo sem as curvas de nível.

5.2. LEVANTAMENTO DE DADOS GEOTÉCNICOS

Os dados geotécnicos utilizados neste trabalho foram obtidos do Plano Diretor de Encosta (PDE) da cidade de Salvador. A Prefeitura Municipal de Salvador (PMS) solicitou o apoio do laboratório de Geotecnia da UFBA para disponibilizar e georreferenciar os diversos ensaios de resistência realizados, obtidos das atividades de pesquisa e extensão do laboratório (JESUS et al, 2005b).

Estes compõem o acervo de dados e investigações geotécnicas do plano, que se tratam de dados georreferenciados em ambiente SIG e que compreendem registros de sondagens (1.567 sondagens à percussão e rotativa) e resultados de ensaios geotécnicos em amostras de blocos indeformados de solos (383 amostras) para a cidade de Salvador (Mattos et al, 2005b) (figura 7).

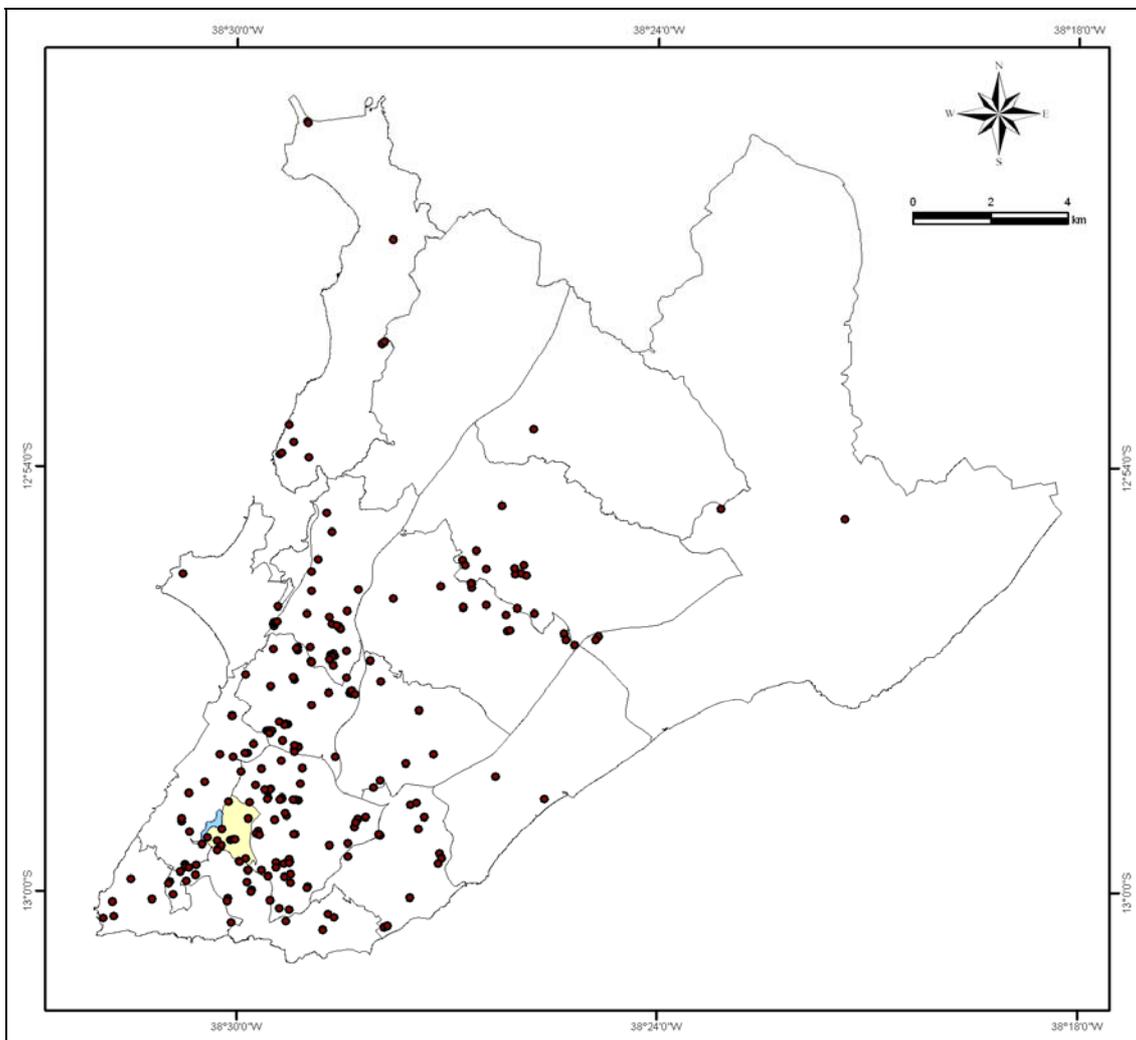


Figura 7 – Distribuição das amostras indeformadas para Salvador e área de estudo.

5.2.1. Tipos de informações geotécnicas

As informações sobre as sondagens foram obtidas após da realização de um inventário nas empresas de engenharia que prestaram ou não serviços à PMS. Todos os boletins de sondagens e relatórios passaram por um processo de escanização, ou seja, conversão de um mapa em papel numa imagem digital, e compõem o acervo do laboratório de Geotecnia da UFBA.

Os resultados dos ensaios obtidos em amostras indeformadas têm como origem os trabalhos que já vinham sendo executados pelo laboratório de Geotecnia. Este laboratório vem caracterizando-se como um provedor de informações referentes às características mecânicas dos solos de Salvador, o qual estruturou as informações sob a forma de banco de dados ou como cadastro em planilhas eletrônicas.

Os diversos ensaios realizados nas amostras indeformadas que compõem este acervo contêm as principais características geotécnicas que permitem a avaliação de áreas de risco de deslizamento. Para cada amostra coletada encontram-se disponíveis as informações referentes a alguns índices físicos do solo (índice de vazios e peso específico dos grãos) e principalmente os parâmetros de resistência ao cisalhamento, obtidos de ensaios de cisalhamento direto ou triaxial (JESUS et al, 2005b).

Neste trabalho apenas utilizaram-se os dados referentes aos resultados dos ensaios obtidos da retirada de amostras indeformadas. Os diversos ensaios apresentaram os valores referentes às variáveis ângulo de atrito (ϕ), coesão (C) e peso específico do solo (γ) para as condições de umidade natural (material natural) e saturada (material inundado ou saturado).

5.2.2. Georreferenciamento das amostras indeformadas

Para o uso nos sistemas de informações geográficas (SIG) todas as amostras passaram por um processo de recuperação de seu posicionamento geográfico ou georreferenciamento.

No resgate do posicionamento das amostras, o laboratório de Geotecnia adotou critérios de espacialização que vão desde a representação da localização feita por simples croquis até o uso de coordenadas geográficas obtidas com GPS (*Global Positioning Systems*) (JESUS et al, 2005b).

Em função da heterogeneidade de representações desta localização, o banco de dados das amostras apresenta o campo NIVEL_QUAL (nível de qualidade). Este

campo visa descrever algumas características iniciais dos dados do tipo: representação locacional (croqui ou planta), o formato de armazenamento (digital ou papel), compatibilidade com a base cartográfica e qual o método de espacialização adotado (GPS, pontos de controle, dentre outros).

A classificação adotada sobre o nível de qualidade em relação a espacialização das amostras é apresentada na tabela 1.

Qualidade	Fator	Descrição
A		Tem as coordenadas com boletim
B		Planta/croqui e furos locados com boletim
	B1	Planta digital compatível com a base cartográfica
	B2	Croqui digital compatível com a base cartográfica
	B3	Planta em papel
	B4	Croqui em papel
C		Planta/croqui sem furos locados com boletim
	C1	Planta digital compatível com a base cartográfica
	C2	Croqui digital compatível com a base cartográfica
	C3	Planta em papel
D		Planta/croqui com boletim
E		Planta/croqui sem boletim
	E1	Planta digital compatível com a base cartográfica
	E2	Croqui digital compatível com a base cartográfica
	E3	Planta em papel
	E4	Croqui em papel
F		Dados sem boletim
G		Locado através da descrição do logradouro
Z		Locadas no centróide do logradouro

Tabela 1: Índice de qualidade do georreferenciamento do material disponível.

Jesus et al (2005b) apresentaram uma descrição sobre o nível de georreferenciamento dos dados, onde os diferentes níveis de espacialização correspondem a diferentes técnicas de ajuste. Estes níveis variam conforme o índice de qualidade de cada amostra. Os dados que foram coletados com GPS de navegação (qualidade A), mesmo sabendo-se dos erros posicionais (± 10 metros) inerentes a este tipo de aparelho, foram inseridos direto no SIG, enquanto que o restante das informações passaram por alguns ajustes.

Qualidade A: Locadas com auxílio de GPS de navegação;

Qualidade B: Locadas com a metodologia de pontos de controle;

Qualidade C: Locadas no centróide da Obra;

Qualidade D: Locadas com um único ponto de referência;

Qualidade G: Locadas com auxílio do software LOUOS;

Qualidade Z: Locadas no centróide do Logradouro.

A descrição de A a Z evidencia o grau de qualidade posicional para cada amostra, definindo também o nível de confiança em relação ao georreferenciamento. Os dados E e F não foram aproveitados por não possuir boletins de sondagens, mesmo assim alguns dados E foram georreferenciados na expectativa de recuperação destes boletins no futuro.

Para as amostras que foram georreferenciadas por pontos de controle, utilizou-se a técnica de transformação entre sistemas de coordenadas. Esta técnica é descrita pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) em seu material disponível na Internet sobre o sistema SPRING aplicado às imagens de satélite (INPE, 2003). Pontos de controle foram identificados na base cartográfica e homologamente na descrição locacional dos dados (mapas ou croquis). Consideraram-se como bons pontos de controle o cruzamento de vias de acesso e o centróide das edificações. Após a definição da malha de pontos de controle, o SIG aplica modelos de transformação entre sistemas, calculando novos valores para todo o espaço geográfico do arquivo. As coordenadas arbitrárias são substituídas pelas coordenadas cartográficas da base.

As informações georreferenciadas com o centróide da obra e com um único ponto de referencia, somente foram utilizadas para espacializar e compatibilizar os dados com a base cartográfica. Estes dados possuem uma incerteza posicional elevada, não sendo aconselhado seu uso para análises pontuais, entretanto, são úteis na avaliação de uma estatística regional ou na definição de parâmetros para áreas de estudo.

Alguns pontos só foram locados com o auxílio do CD-ROM desenvolvido pela PMS. O CD da Legislação de Ordenamento e Uso e Ocupação do Solo (LOUOS) é um programa comercializado pela prefeitura para a localização de logradouros, dentre outros dados (JESUS et al, 2005b). Alguns dados só possuíam informações referentes ao logradouro e com o auxílio do CD da LOUOS e da base cartográfica estes pontos foram locados.

Algumas locações só puderam ser espacializadas através da adoção das coordenadas do centróide do logradouro como coordenadas válidas. Em consequência disso existe a presença de várias amostras sobrepostas a uma única localização geográfica.

5.3. MODELO NUMÉRICO DE TERRENO (MNT)

A base cartográfica utilizada apresenta todo o mapeamento plani-altimétrico da cidade de Salvador em escala 1:2.000. O relevo da cidade está representado sob a forma de curvas de nível com equidistância de 1 metro entre as curvas. A tabela de atributos dos arquivos CAD, quando importados pela aplicação SIG, apresentam o preenchimento da informação de altitude (*elevation*).

Esta informação permite a utilização de interpoladores, já bem desenvolvidos e disponíveis para a elaboração de modelos numéricos de terreno, tipo: redes de triângulos irregulares, interpoladores hidrológicamente corretos como o “*Topogrid*” do *ArcInfo*, inverso de quadrado das distâncias, krigagem, entre outros (WILSON e GALLANT, 2000, GUIMARÃES, 2000).

Os dados altimétricos convertidos da base cartográfica passaram por uma etapa de pré-processamento para a geração do modelo numérico. Este pré-processamento consistiu em checar possíveis irregularidades de preenchimento nos valores das cotas e também checar a topologia dos objetos cartográficos.

5.3.1. Módulo Topo to Raster do software ArcGIS 9x

Guimarães (2000) apresenta várias metodologias para a obtenção de um modelo numérico de terreno como representação da superfície topográfica de uma região. Dentre as metodologias propostas a que se destacou foi a utilização do módulo *Topogrid* do *software ArcInfo*, apresentando a menor média de diferenças quando comparado aos resultados obtidos pela krigagem multi-direcional, krigagem, inverso do quadrado das distâncias e intercon do Idrisi.

O módulo *Topogrid* realiza a interpolação gerando uma estrutura de drenagem hipotética, eliminando depressões que não estão de acordo com o fluxo gravitacional. Além disso, possui a opção de utilizar outras camadas de informações, usualmente levantadas em qualquer base cartográfica, tais como, as informações de drenagem e corpos d’água como lagos e represas, ou até mesmo pontos cotados, o que levam a um sensível aumento na precisão do MNT (GUIMARÃES, 2000).

Na ferramenta SIG que foi utilizada neste trabalho, *ArcGIS 9x* e o módulo *Spatial Analyst*, o mesmo algoritmo que serve de base para o desenvolvimento do *Topogrid* foi implementado sob a denominação de *Topo to Raster*. Este módulo gera modelos numéricos de terreno hidrológicamente corretos. O MNT com resolução espacial de 1 m² (células de 1 m x 1 m) foi elaborado para dar suporte as análises matemáticas (figura 8).

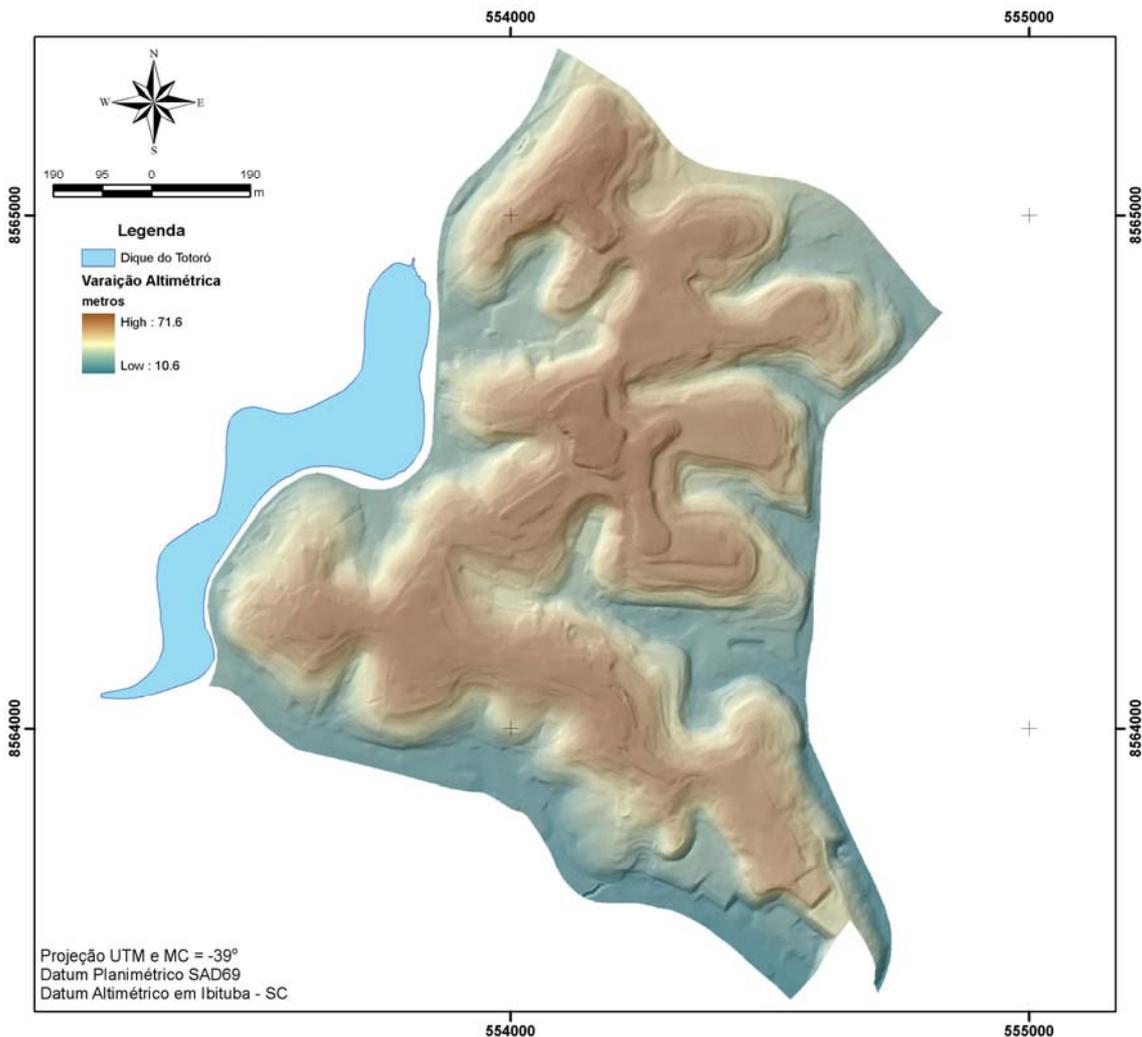


Figura 8 – Representação gráfica do modelo numérico de terreno da área de estudo.

5.3.2. Declividade

Utilizou-se o módulo *Spatial Analyst* para calcular o mapa de declividade da área a partir do MNT, pois este módulo permite que o SIG incorpore operações baseadas em álgebra matricial nas suas análises. A partir do MNT obteve-se como produto uma matriz regular que representa a distribuição do ângulo de declividade da área de estudo (figura 9).

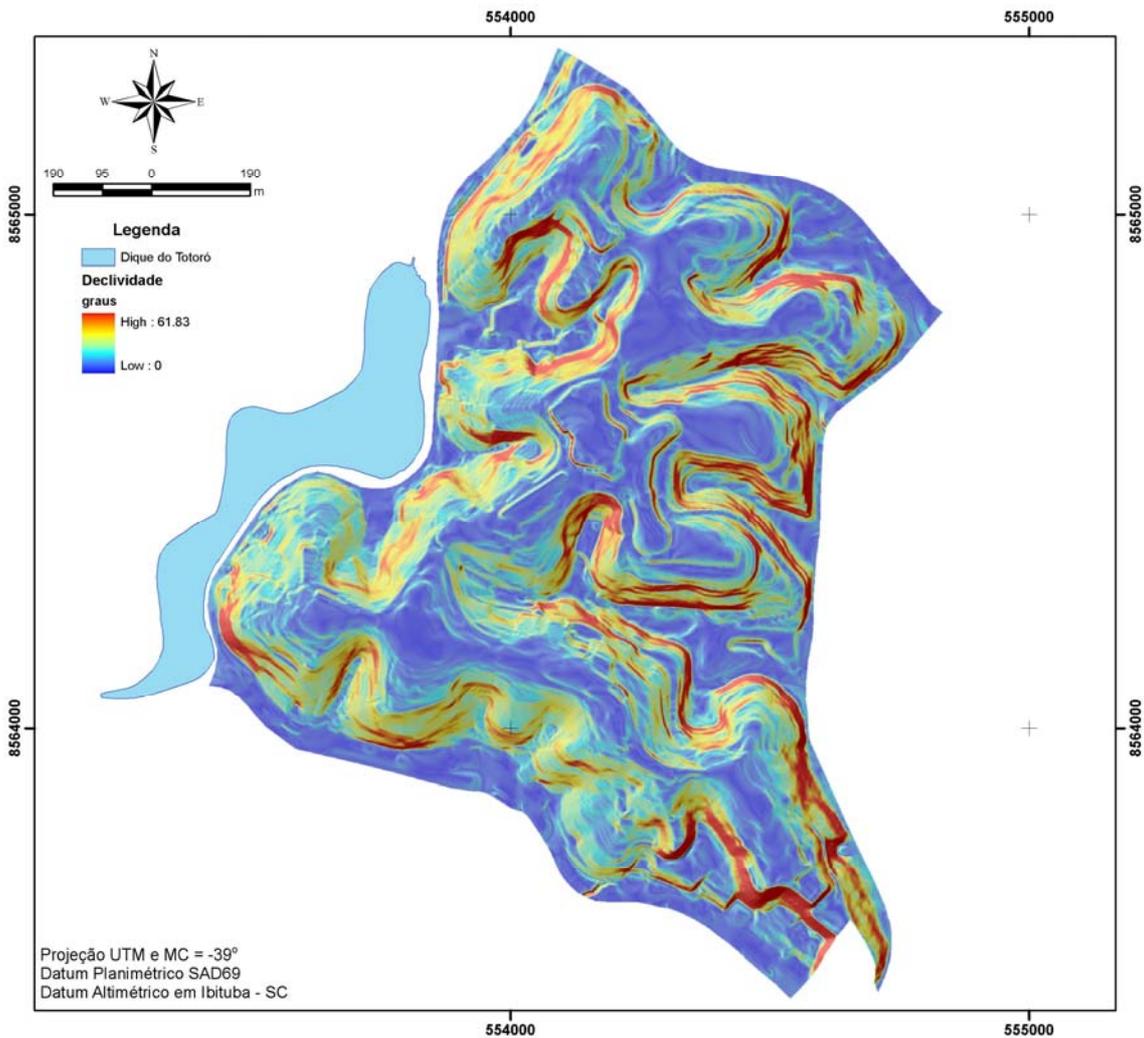


Figura 9 – Mapa de variação do ângulo de declividade.

Com a viabilidade em se trabalhar com modelos matemáticos previsionais e se gerar estruturas topográficas como o MNT, os valores de declividade passaram a ser computados como variáveis distribuídas para todo um espaço geográfico definido.

Como observado no mapa de declividade, a área possui ângulos de declividade distintos para regiões diferentes dentro do contexto da área de estudo. A declividade máxima calculada é de 62°, o que equivale a uma declividade de 190%.

5.4. MODELAGEM MATEMÁTICA

A modelagem matemática (modelo de estabilidade de encosta) realizada neste trabalho tem como base a teoria do talude infinito. O cálculo de estabilidade foi executado através da ferramenta de álgebra matricial da aplicação SIG, tendo como resultado a variação geográfica do fator de segurança para toda a área e não somente para um talude específico.

5.4.1. Cálculo do fator de segurança (FS)

Para avaliar a suscetibilidade ao deslizamento de terra torna-se necessário adotar uma formulação matemática para avaliar a estabilidade da encosta. A equação 3, descrita no capítulo 2, foi aplicada para a área de estudo por meio da ferramenta de álgebra matricial chamada *raster calculator*. Esta ferramenta permite realizar operações matemáticas distribuídas para toda a área.

O uso da equação 3 se deve em função da profundidade do freático na área ser superior a 5 metros, ou seja, neste trabalho considera-se a que a presença do nível de água encontra-se abaixo da superfície de ruptura do talude.

$$FS = \frac{c}{\gamma * h * \text{sen}\beta . \text{cos}\beta} + \frac{\text{tan}\phi}{\text{tan}\beta} \quad (3)$$

Os dados relacionados com a morfologia do terreno ($\text{sen}\beta$, $\text{cós}\beta$ e $\text{tan}\beta$) foram obtidos após a elaboração do MNT. Para cada célula do mapa de declividade o valor do ângulo de declividade encontra-se armazenado. Os valores geograficamente distribuídos para as variáveis, ângulo de atrito, coesão e peso específico do solo, foram retirados do levantamento de dados geotécnicos disponível e interpolados por meio de uma análise geoestatística básica.

Os parâmetros geotécnicos variam de acordo com seu posicionamento geográfico, ou seja, são variáveis que possuem dependência geográfica. Uma análise distribuída foi executada para estes parâmetros ao invés de se trabalhar com valores médios.

Como cada parâmetro de entrada para a resolução da equação 3 é uma variável distribuída para toda a área de estudo, o resultado desta equação é uma matriz onde cada célula armazena um valor unitário de FS, com isso pode-se observar a variação geográfica do FS para toda a área.

5.4.2. Distribuição geográfica dos parâmetros geotécnicos

Para elaboração da distribuição geográfica dos parâmetros geotécnicos se utilizou como base os trabalhos desenvolvidos por Jesus et al (2005b), Manzione (2002) e Camargo et al (2001).

A interpolação é um procedimento matemático de ajuste de uma função a pontos não amostrados, baseando-se em valores obtidos em pontos amostrados (LANDIM, 2000). Com base nos pontos geotécnicos amostrados e através do método geoestatístico

baseado em krigagem calculou-se a distribuições dos parâmetros geotécnicos para toda a área estudada.

Segundo Camargo et al (2001) a análise espacial permite que dados disponíveis de forma pontual sejam interpolados gerando uma superfície que representa o padrão de distribuição da variável estudada.

Jesus et al (2005b) concluíram que o uso da técnica de krigagem ordinária é um bom interpolador espacial para parâmetros geotécnicos como ângulo de atrito, coesão e peso específico do solo.

O resultado da distribuição geográfica dos parâmetros geotécnicos corresponde a obtenção de 5 mapas que cobrem os valores de coesão e ângulo de atrito, na condição de umidade natural e saturada, e dos valores de peso específico do solo na condição de umidade natural.

5.4.3. Cenários de suscetibilidade

Todos os parâmetros necessários para o cálculo do fator de segurança foram resultados de uma análise distribuída, exceto os valores de profundidade da superfície de ruptura (h). O produto obtido da equação 3 é um mapa contendo a distribuição dos valores de FS.

Para diferentes tipos de profundidade da superfície de ruptura, neste trabalho foram executadas análises para superfícies variando entre 1 e 4 metros de profundidade, variações distintas do FS foram obtidas. Cada condição de simulação obteve resultados distintos de suscetibilidade a deslizamento.

Para facilitar a interpretação dos resultados foi executada uma etapa de reclassificação, onde foram definidas 5 classes diferentes de estabilidade. A definição das classes de risco seguiu a mesma definição dos mapas temáticos elaborados por Amaral e Fiori (2004) (tabela 2). Esta classificação define as áreas potenciais a deslizamento.

Condição	Classe	Estagio de predição
FS > 1.50	5	Áreas sem risco
1.30 < FS < 1.50	4	Áreas de risco baixo
1.15 < FS < 1.30	3	Áreas de risco médio
1.00 < FS < 1.15	2	Áreas de risco alto
FS < 1.00	1	Áreas na iminência de escorregamento

Tabela 2 – Definição das classes de estabilidade baseada nos valores de FS (AMARAL e FIORI, 2004).

Outras classificações de deslizamento podem ser adotadas em função dos valores da matriz de distribuição do FS na área. Como esta matriz armazena os valores unitários de FS qualquer nova classificação (condição) pode ser adotada.

Cada cenário de simulação obtido define áreas com diferentes condições de FS, demarcando então, zonas de maior ou menor suscetibilidade a deslizamento de terra. A pior condição de análise serviu de base para uma visita a campo, com a finalidade de se observar o nível de reposta do modelo, na definição do que realmente podem ser consideradas como áreas críticas.

5.4.4. Visita a campo de pontos suscetíveis a deslizamento

O cenário que definiu a pior condição de estabilidade da área serviu de base para a visita a campo. Essa visita teve o objetivo de se observar alguns pontos críticos, definidos pela modelagem matemática, que foram classificados como de risco alto e na iminência de deslizamento.

Elaborou-se um mapa contendo a localização dos pontos visitados, as edificações da área e as vias de acesso. Para cada ponto de amostragem foram registradas fotografias que permitiram ilustrar a compatibilidade pelo que foi definido na modelagem matemática, como áreas suscetíveis a deslizamento, e a situação real de campo.

Todas as observações de campo foram registradas e serviram de controle visual para a análise dos resultados da metodologia aqui proposta.

Capítulo 6

Resultados e Discussões

Este capítulo apresenta os resultados obtidos após a execução das atividades previstas na metodologia descrita no capítulo 5.

6.1. DADOS GEOTÉCNICOS

A distribuição geográfica das amostras indeformadas evidencia a aleatoriedade no seu posicionamento geográfico. Esta distribuição irregular se deve ao fato de que o acervo geotécnico representa o resultado da execução de vários projetos com objetivos distintos.

Em função de poucas amostras estarem inseridas na área de estudo e para uma melhor caracterização geotécnica, foram acrescentadas a este estudo algumas amostras que se localizavam na vizinhança da área. Perfazendo assim a total de 129 amostras que possuem resultados obtidos de ensaios em laboratório (figura 10). Deste total podemos considerar 110 amostras na vizinhança e 19 amostras dentro da área.

Das 129 amostras disponíveis para a área de estudo e sua vizinhança, somente 63 amostras representavam uma localização geográfica única. O restante das 66 amostras disponíveis correspondia à sobreposição de duas ou mais amostras a uma mesma posição geográfica.

Os valores dos parâmetros geotécnicos atribuídos às amostras sobrepostas corresponderam aos valores médios, ou seja, se a determinado par de coordenadas geográficas estavam associadas três valores referentes ao parâmetro de coesão do solo, o valor obtido para essa posição é o resultado da média aritmética dos três valores de coesão para esse par de coordenadas.

A tabela 3 apresenta a distribuição percentual das amostras disponíveis para a área de estudo e sua relação com a qualidade posicional. Fica evidente o alto nível de incerteza locacional que os resultados obtidos dos ensaios geotécnicos apresentam, onde, 4.65% das amostras foram locadas com GPS e mais de 70% foram locadas no centróide do logradouro ou locadas com o auxílio do software da LOUOS.

Qualidade	Nº de Amostras	Percentual (%)
A	6	4.65
B3	25	19.38
D	6	4.65
G	46	35.66
Z	46	35.66
Total	129	100

Tabela 3: Distribuição do índice de qualidade de georreferenciamento das amostras indeformadas da área e seu entorno.

Estes dados comprovam o que foi observado por Jesus et al (2005b), esses autores evidenciaram a falta de cultura em se utilizar referenciais cartográficos para a locação das amostras indeformadas. Esta característica não inviabiliza as análises executadas em função da escala estudo deste trabalho.

Do banco de dados geotécnico foram selecionados os parâmetros de coesão e ângulo de atrito, obtidos dos resultados de ensaios inundados ou saturados e na umidade natural, e os valores de peso específico na umidade natural.

A tabela 4 apresenta um resumo das características das variáveis coesão (c), ângulo de atrito (Φ) e peso específico do solo (γ) dos dados obtidos dos ensaios geotécnicos disponíveis.

	C saturado	C natural	Φ saturado	Φ natural	γ natural
Valor mínimo	1.12	11.5	9.2	21.6	13.57
Valor máximo	53.39	104.46	42.5	48.9	27.3
Média	15.50	39.71	29.48	34.14	16.46
Desvio padrão	10.69	22.57	5.72	4.94	2.11
Coefficiente de Variação	68.52%	56.84%	19.40%	14.47%	12.82
Total de amostras	56	43	58	43	63

Tabela 4: Análise exploratória dos parâmetros geotécnicos disponíveis. Unidades: Ângulo de atrito (Φ) em graus, coesão (C) em KPa e peso específico (γ) kN/m³.

Desvio padrão e coeficientes de variação altos são indicativos de heterogeneidade das amostras (JESUS et al, 2005b). Quando os valores do desvio padrão são muito altos ou próximos dos valores médios da distribuição amostral, isso significa que as amostras apresentam um certo grau de dependência espacial. Após a análise exploratória dos dados e pelo fato do fenômeno aqui estudado ter representatividade geográfica, se considerou que um tratamento geoestatístico básico para os parâmetros geotécnicos é mais aconselhável que um tratamento baseado em estatística tradicional.

6.2 DISTRIBUIÇÃO GEOGRÁFICA DOS PARÂMETROS GEOTÉCNICOS

Os mapas de distribuição geográfica foram obtidos para os valores de coesão e ângulo de atrito, material natural e inundado ou saturado, e para os valores de peso específico do solo na umidade natural (figuras 11, 12, 13, 14 e 15).

Os mapas gerados possuem duas funções. A primeira consiste na visualização do comportamento das variáveis interpoladas em relação a toda área de estudo. Na segunda estes mapas representam os dados de entrada da equação para o cálculo da distribuição do fator de segurança da área. Utilizou-se na geração dos mapas de distribuição o interpolador krigagem ordinária.

Como não é objetivo deste trabalho o estudo mais detalhado das possibilidades de uso da geoestatística em geotécnica, este se deteve na interpretação dos passos adotados pelo trabalho de Jesus et al (2005b) que permitiram obter como resultado a regionalização das variáveis geotécnicas necessárias ao cálculo do FS.

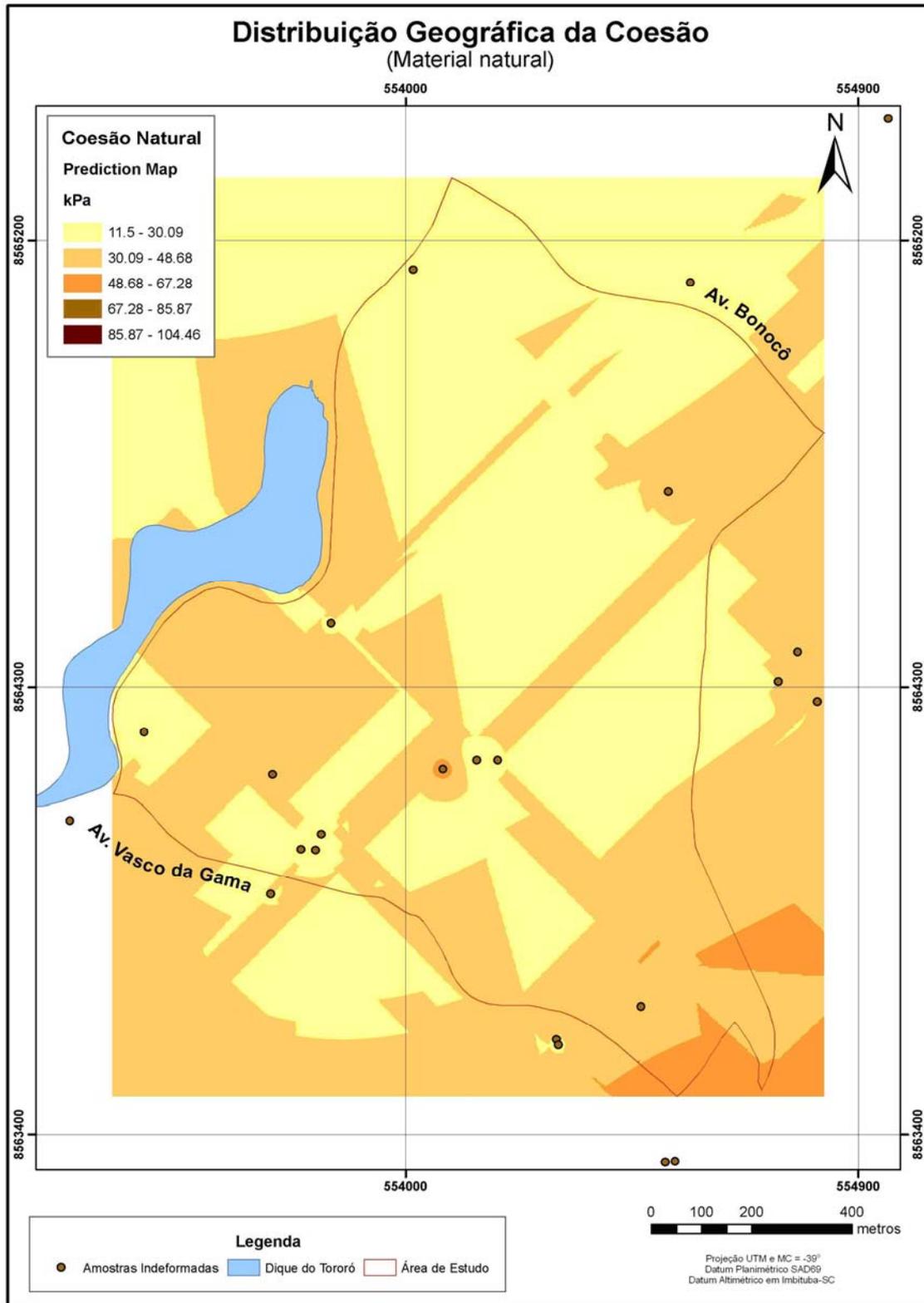


Figura 11 – Distribuição geográfica da coesão para unidade natural.

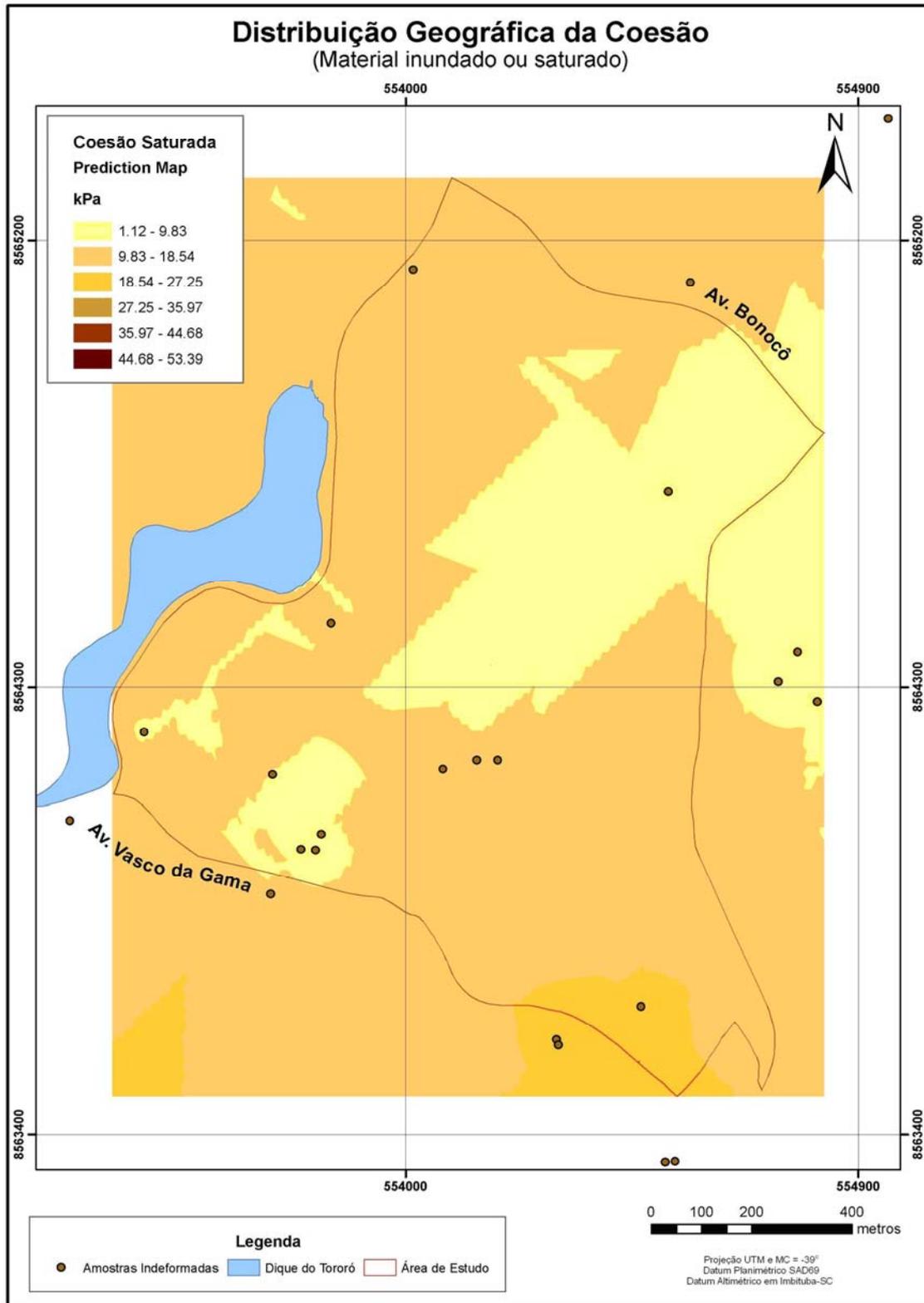


Figura 12 - Distribuição geográfica da coesão para material inundado ou saturado.

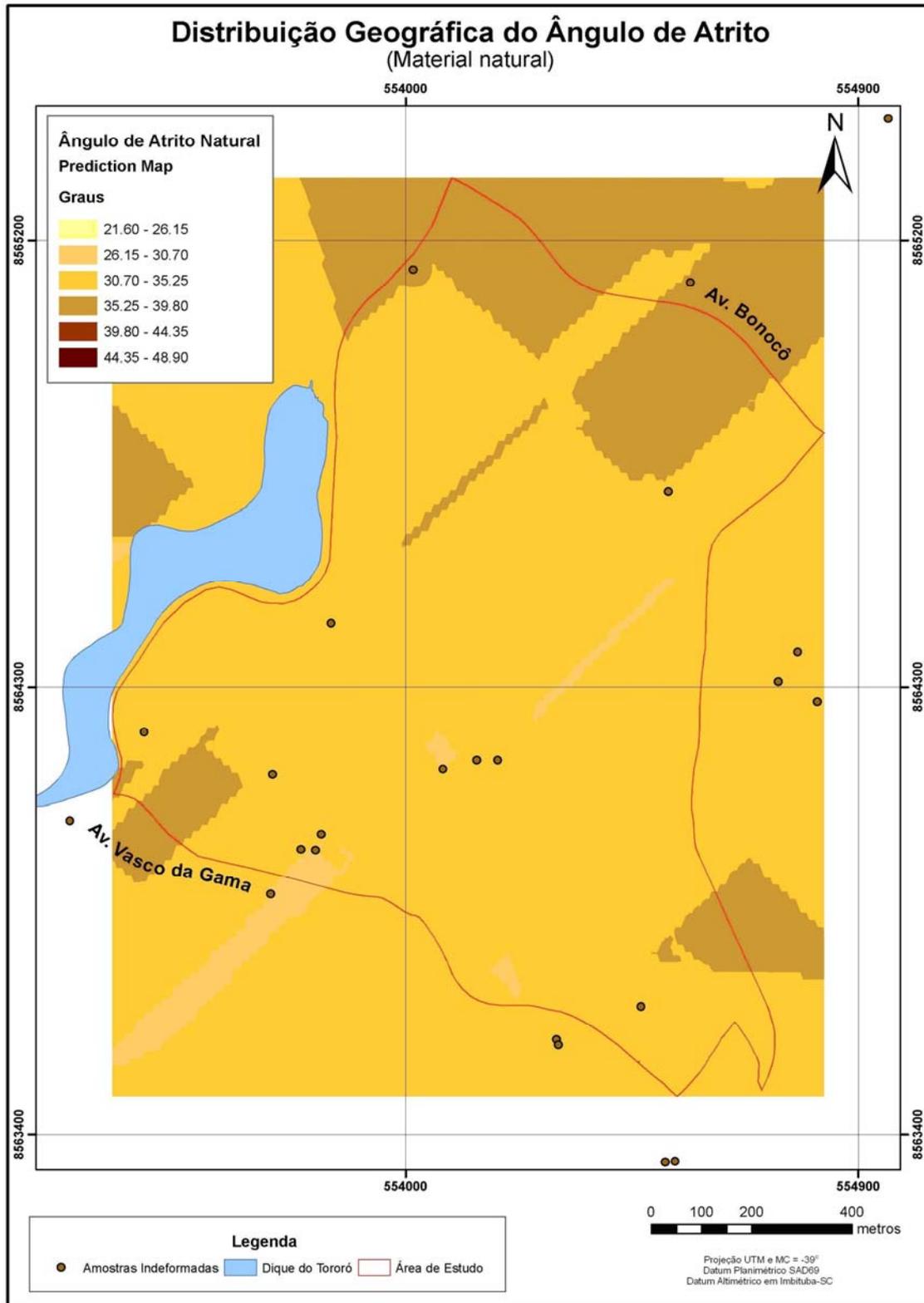


Figura 13 - Distribuição geográfica do ângulo de atrito para umidade natural.

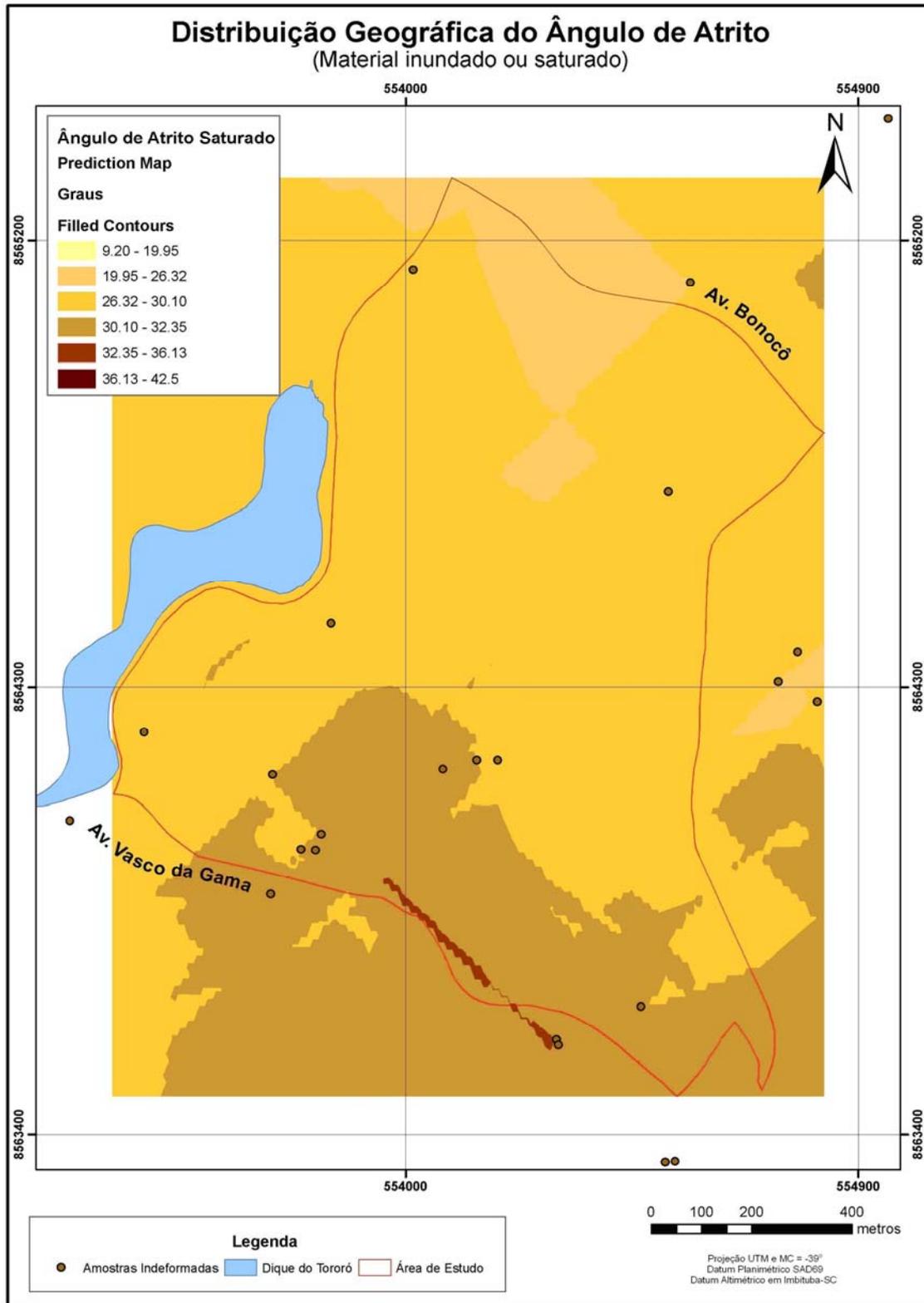


Figura 14 - Distribuição geográfica do ângulo de atrito para o material inundado ou saturado.

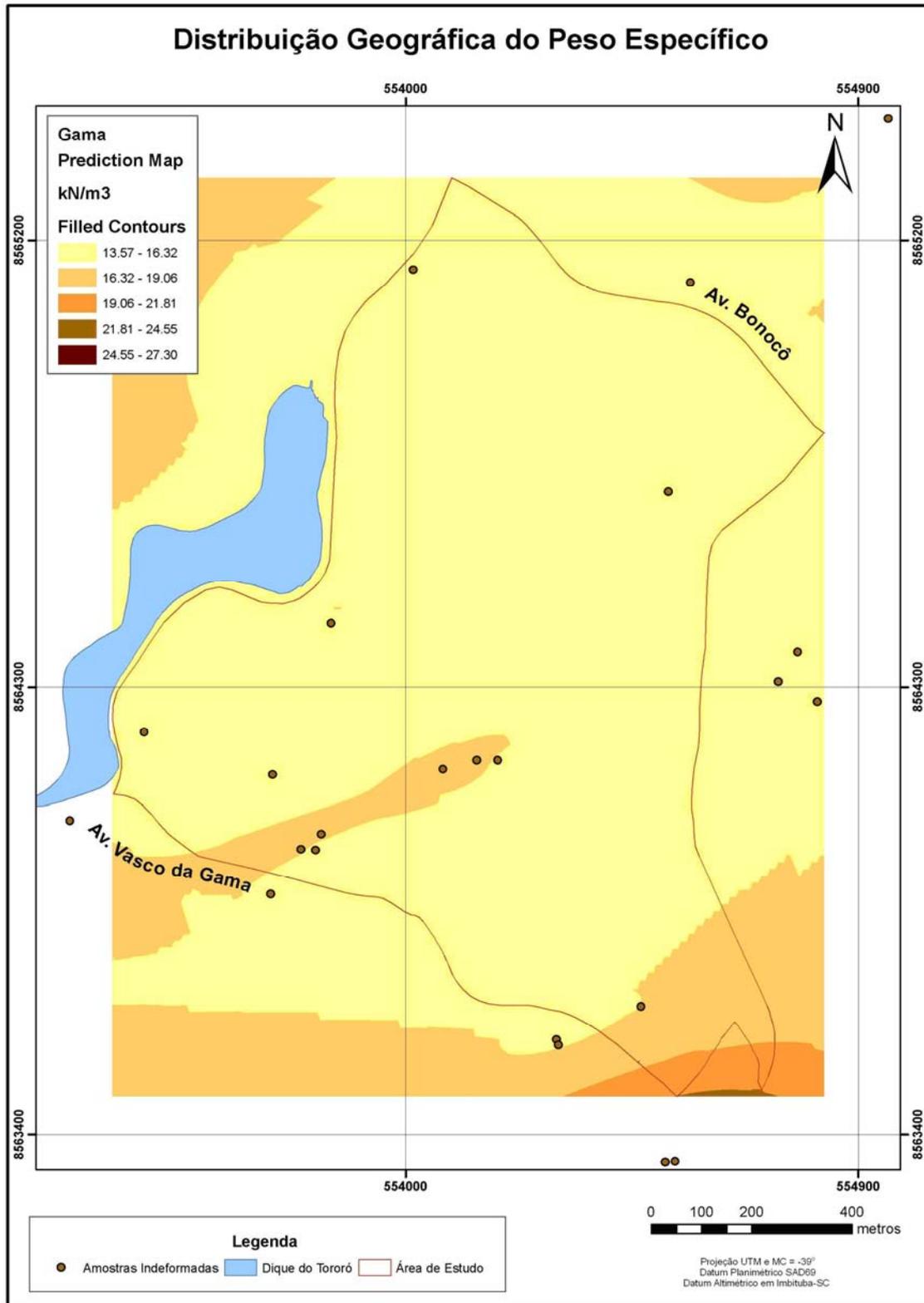


Figura 15 – Distribuição geográfica do peso específico.

O mapa de coesão para o material natural apresenta uma distribuição disforme em função da presença de uma amostra, mais ou menos no centro da área, que eleva os valores de coesão para a faixa de 48.68 a 67.28 kPa. Fica evidente uma tendência no aumento dos valores de coesão quando se caminha para a parte sul da área. As amostras obtidas de ensaios inundados também apresentam uma tendência a concentração das maiores faixas de coesão também na porção sul da área.

O variável ângulo de atrito para os ensaios em material natural reflete uma concentração das maiores faixas ângulos (de 32.25° até 39.80°) na porção norte da área, enquanto que para as amostras na condição inundada ou saturada apresenta uma concentração das maiores faixas de ângulos (de 30.10° até 32.35°) na porção sul. Isso representa uma inversão na concentração dos maiores valores de ângulo de atrito quando existe a presença de água ou de uma frente de umedecimento.

Os valores de peso específico do solo apresentam uma uniformidade em sua variação, sendo quase que totalmente coberta pelos valores que variam entre 13.57 a 16.32 kN/m³. Somente o mapa de distribuição que corresponde a variação do peso específico das amostras na condição de umidade natural foi elaborado neste trabalho.

Qualquer anisotropia ou linha de tendência pode estar sendo influenciada pela distribuição irregular das amostras na área de estudo. Fica evidente a maior concentração de amostras na porção sul e a existência de algumas amostras próximas formando um trend nordeste – sudoeste.

6.3. CENÁRIOS DE SUSCETIBILIDADE OBTIDOS DA MODELAGEM MATEMÁTICA

A modelagem matemática consistiu na aplicação da equação 3 para a área de estudo. Os dados geotécnicos de entrada foram obtidos dos arquivos gerados pela distribuição geográfica das variáveis geotécnicas a partir do método geoestatístico de krigagem ordinária.

$$FS = \frac{c}{\gamma * h * \sin \beta \cdot \cos \beta} + \frac{\tan \phi}{\tan \beta} \quad (3)$$

Os dados referentes a ângulo de atrito (ϕ), coesão (C) e peso específico do solo (γ) foram extraídos do resultado da interpolação que gerou os mapas de distribuição geográfica. Os valores do ângulo de declividade (β) foram obtidos do MNT. Todos os dados acima foram calculados para cada célula que se encontra distribuída na área. A

profundidade da superfície de ruptura (h) é uma variável fixa com variação de 1 a 4 metros para a obtenção dos diferentes cenários de análise.

Estes cenários, para os diferentes valores de profundidades (h), podem ser analisados como o comportamento que a área tem, quando da presença de uma frente de umedecimento ou saturação, que avança de 1 a 4 metros e conseqüentemente delimita áreas suscetíveis a deslizamento.

Após a execução da modelagem matemática foram obtidos sete cenários de análise. Para as condições de análise onde os parâmetros geotécnicos representavam as amostras na condição saturada (material inundado ou saturado) foram obtidos quatro cenários e para as análises onde as amostras representavam a condição de umidade natural (material natural) foram obtidos dois cenários.

6.3.1. Parâmetros de resistência obtidos de ensaios na umidade natural

Para os dados de entrada correspondentes aos mapas das distribuições geográficas de coesão e ângulo de atrito nas condições de umidade natural, o mapa de declividade e a distribuição dos valores de peso específico, duas condições foram modeladas. Um cenário contemplando a presença de uma superfície de ruptura com uma profundidade de 3 metros (figura 16) e um outro cenário contemplando uma superfície de ruptura com uma profundidade de 4 metros (figura 17).

O cenário obtido para a superfície de 3 metros teve como resultado que toda a área encontra-se inserida no que se classificou como sendo de baixo risco ou sem risco de deslizamentos. Para o segundo cenário modelado, levando-se em consideração a presença de uma superfície de ruptura de 4 metros, obteve-se como resultado a presença de menos de 1% de toda a área inserida no contexto de áreas de risco médio.

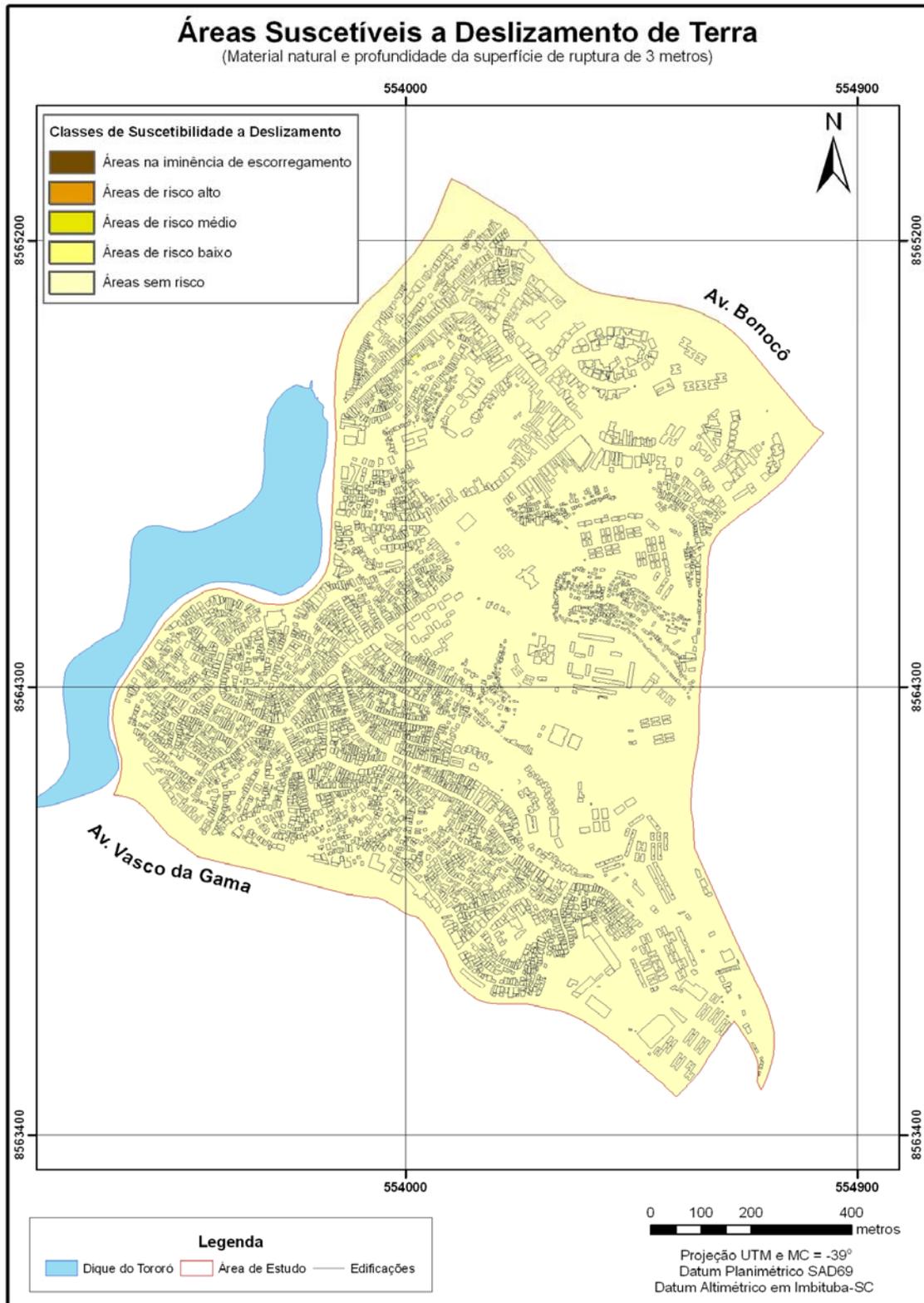


Figura 16 – Cenário de simulação para a unidade natural e superfície de ruptura com profundidade de 3 metros.

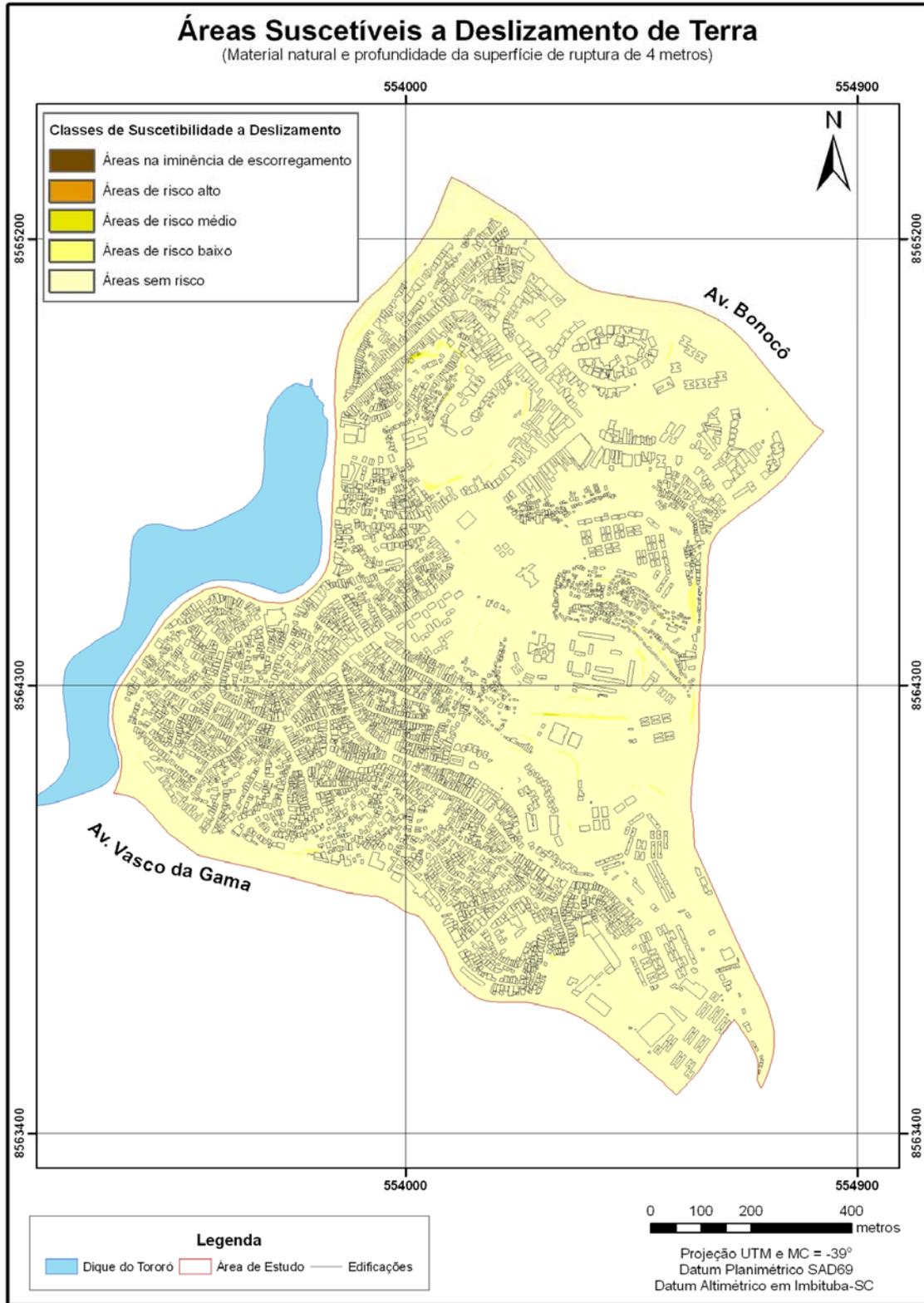


Figura 17 – Cenário de simulação para a unidade natural e superfície de ruptura com profundidade de 4 metros.

6.3.2. Parâmetros de resistência obtidos de ensaios inundados ou saturados

Seguindo-se o mesmo princípio dos mapas de suscetibilidade obtidos para as condições de umidade natural e trabalhando-se para este caso, com os mapas das distribuições geográficas de coesão e ângulo de atrito para as amostras inundadas ou saturadas, e, mantendo-se os mesmos mapas referentes a declividade e peso específico do solo, quatro condições foram modeladas.

Cada condição modelada gerou um cenário de análise e estes cenários previam a existência de uma superfície de ruptura que variava de 1 a 4 metros de profundidade (h), ou seja, as quatro simulações representaram as condições de análise de h = 1 (figura 18), h = 2 (figura 19), h = 3 (figura 20) e h = 4 metros (figura 21).

Os resultados evidenciaram que a medida que a superfície de ruptura aumenta ou a medida que a frente de umedecimento atinge uma maior profundidade, há um aumento da quantidade de áreas classificadas como sendo de iminência de deslizamentos e como sendo áreas de risco alto de deslizamento.

A tabela 5 representa o percentual da área estudada que se encontra classificada como sendo de alto risco a deslizamento. O cenário obtido para a presença de deslizamento com profundidade de 1 metro tem como resultado que toda a área encontra-se inserida na classificação de uma área sem risco de deslizamento.

Para uma situação simulada em que uma frente de saturação ou umedecimento atinja a profundidade de 4 metros, obtêm-se então como cenário, a definição de que 5% da área de estudo encontra-se classificada como área de iminência de escorregamento e área de alto risco de escorregamento. Esse percentual corresponde aproximadamente a uma área de 69.700 m² com grande potencial de deslizamento de terra para a situação modelada.

Classes de Predição	H = 1		H = 2		H = 3		H = 4	
	Células	%	Células	%	Células	%	Células	%
Iminência de Escorregamento	0	0	433	0.03	14.095	1.02	33.102	2.39
Risco Alto	0	0	7.204	0.52	25.772	1.86	36.598	2.65
Risco Médio	0	0	17.693	1.28	35.847	2.59	40.574	2.93
Risco Baixo	0	0	37.991	2.75	53.989	3.90	63.386	4.58
Sem Risco	1.382.032	100	1.319.711	95.42	1.252.329	90.62	1.209.372	87.44
TOTAL	1.383.032	100	1.383.032	100	1.383.032	100	1.383.032	100

Tabela 5 – Variação do percentual de áreas suscetíveis a deslizamento a medida que a profundidade da frente de umedecimento ou superfície de ruptura aumenta.

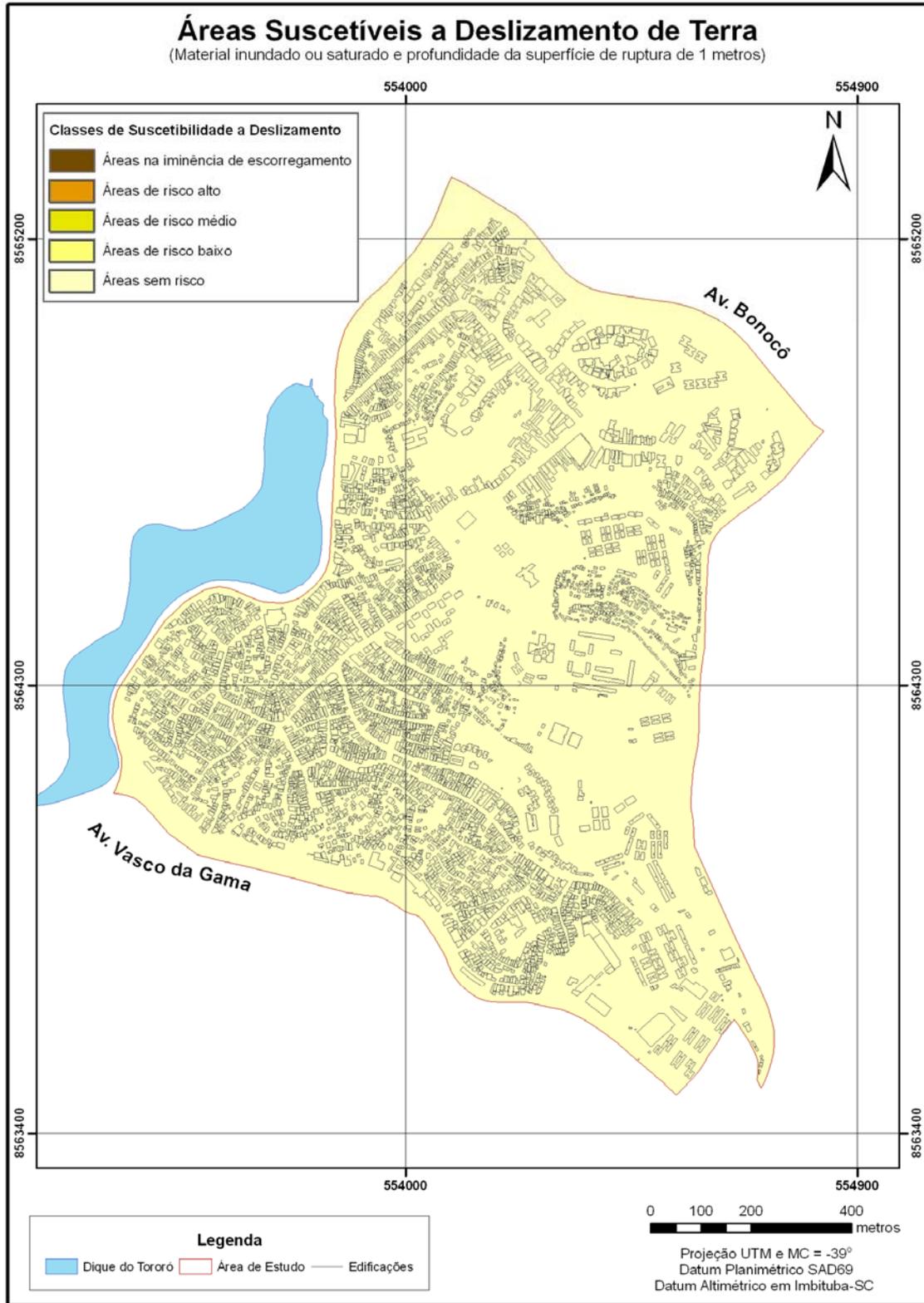


Figura 18 – Cenário de simulação para um material inundado ou saturado e superfície de ruptura com profundidade de 1 metros.

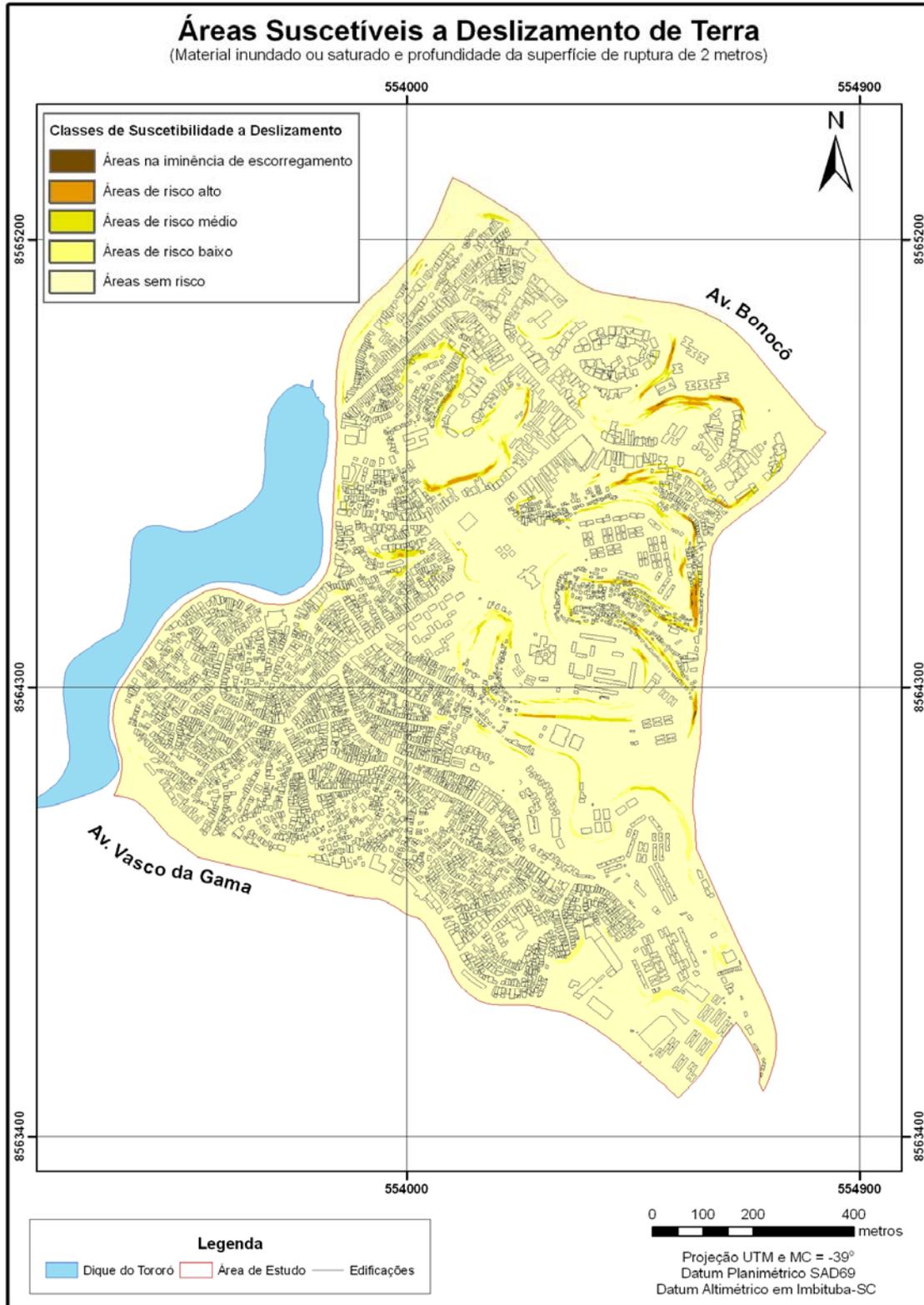


Figura 19 – Cenário de simulação para um material inundado ou saturado e superfície de ruptura com profundidade de 2 metros.

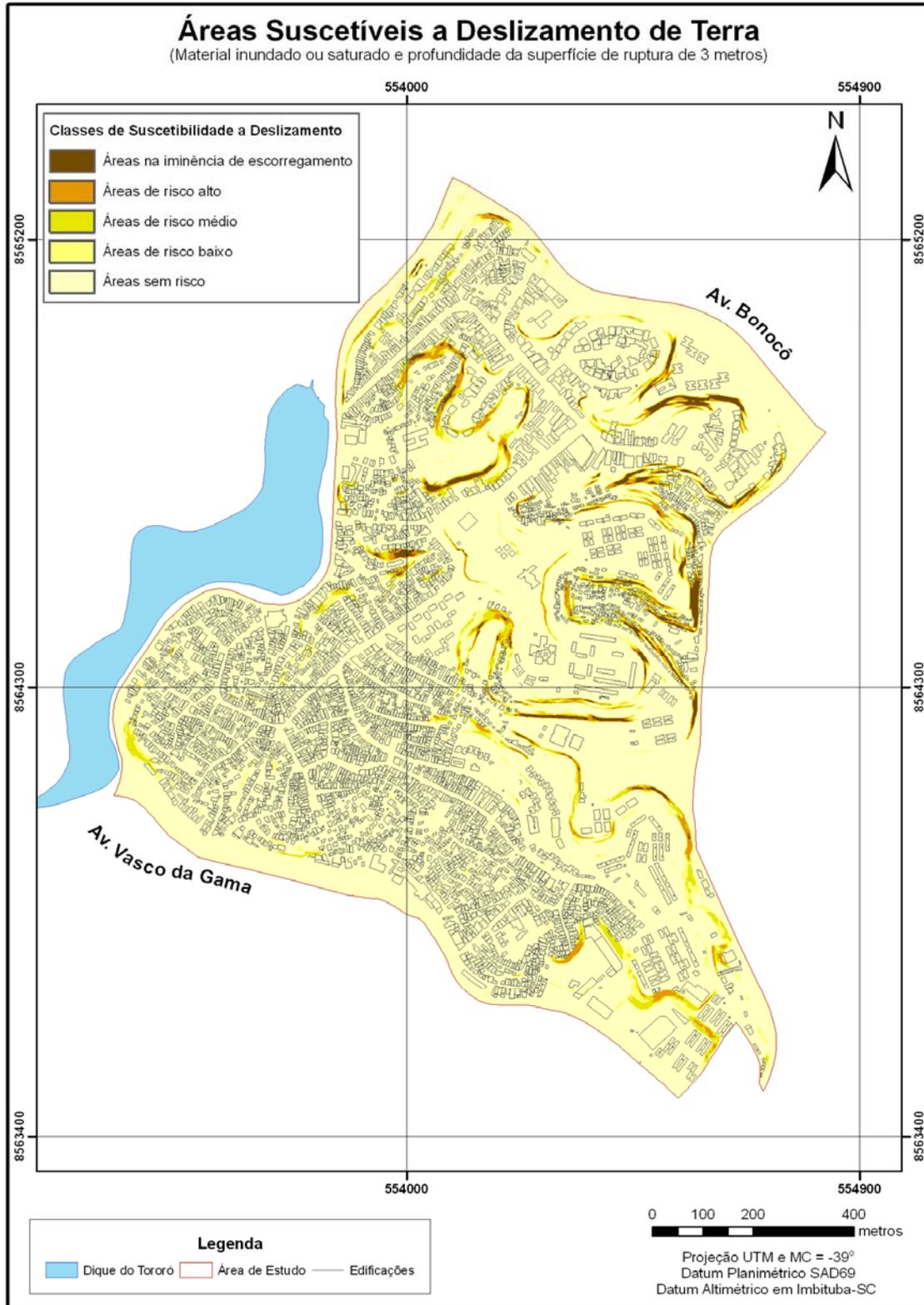


Figura 20 – Cenário de simulação para um material inundado ou saturado e superfície de ruptura com profundidade de 3 metros.

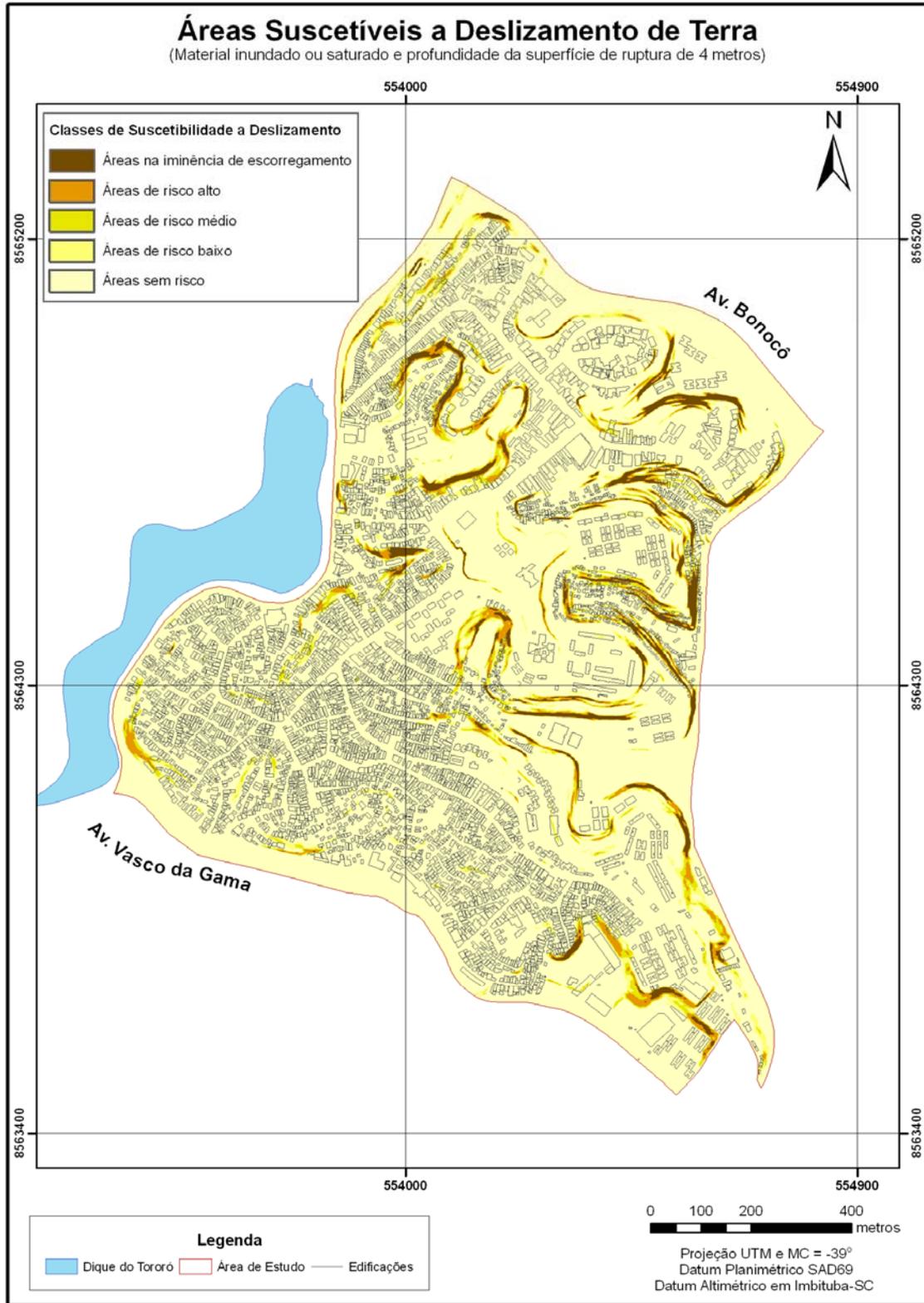


Figura 21 – Cenário de simulação para um material inundado ou saturado e superfície de ruptura com profundidade de 4 metros.

6.4. VISITA A CAMPO PARA A OBSERVAÇÃO DE PONTOS CRÍTICOS

Após a definição do pior cenário de análise obtido, representando a distribuição do fator de segurança para as amostras na condição saturada e para a profundidade da superfície de ruptura de 4 metros, realizou-se uma visita a campo para a observação de alguns pontos críticos definidos como sendo de áreas de iminência e de risco alto a deslizamento.

Esta visita teve como objetivo a validação visual e documental do mapa de suscetibilidade a deslizamento de terra obtido, correspondendo ao pior cenário de análise como já descrito.

Foram visitados 16 pontos ao longo da área (figura 22). Estes pontos coincidiram com as áreas modeladas caracterizadas como de iminência a deslizamento e de risco alto a deslizamento. A distribuição dos pontos visitados se ateve a questões como facilidade de acesso a determinadas áreas e a falta de segurança.

Várias áreas modeladas já apresentavam algum tipo de intervenção da prefeitura, como os pontos P02 (figura 24), P03 (figura 25), P04, P05, P06, P07 (figura 26), P09, P14 e P16. Os pontos P01 (figura 23), P10, P13 (figura 29) e P15 representam situações de risco, sendo que no ponto P15 observou-se a presença de uma árvore tombada. O ponto P12 (figura 28) não representa área de risco em função das melhorias feitas no talude por meio do plantio de vegetação. O ponto P11 (figura 27) representa uma cicatriz de deslizamento que ocorreu em março de 2005 e aterrou o veículo de um dos moradores de um condomínio nas proximidades da Av. Bonocô.

Uma área representada no mapa como ponto de referência foi visitada pois representava localização um deslizamento antigo. Neste ponto não foi feita nenhuma descrição para ser considerada como um ponto de observação.

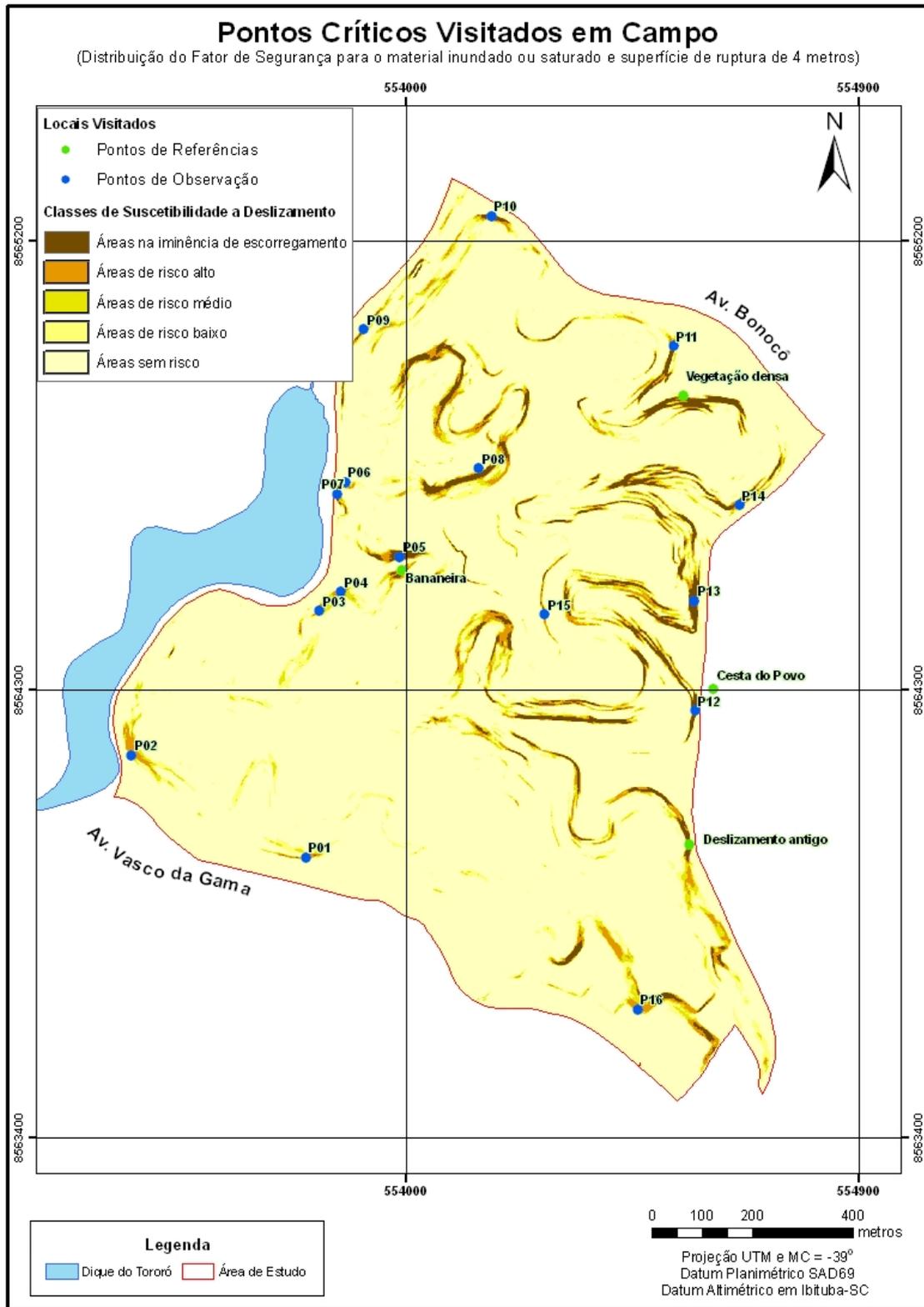


Figura 22 – Mapa de suscetibilidade a deslizamento de terra e a distribuição de pontos visitados em campo.



Figura 23 – Fotografia de um talude de 8 a 10 metros com pouca vegetação, apresentando sulcos de erosão (P01).



Figura 24 – Fotografia de uma contenção de cortina atirantada na ligação entre a Av. Vasco da Gama e o Dique do Tororó (P02).

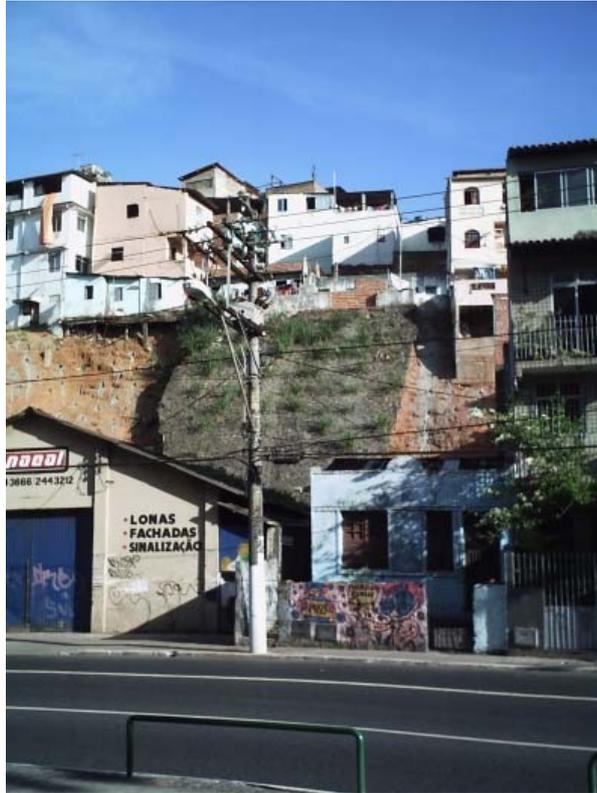


Figura 25 – Fotografia de um talude com intervenção da PMS apresentando uma solução de solo grampeado implementada e em implementação (P03).



Figura 26 – Fotografia de uma alvenaria de pedra na base do talude localizado no Dique do Tororó (P07).



Figura 27 – Fotografia de uma (a) cicatriza de um escorregamento, onde ocorreu o soterramento de um carro, ocorrido em março de 2005 e (b) do rompimento da tubulação de esgoto, em condomínio residencial (P11).



Figura 28 – Talude íngreme totalmente vegetado no Vale do Ogunjá (P12).



Figura 29 – Fotografia de um talude íngreme e pouco vegetado apresentando construções em sua base no Vale do Ongunjá (P13).

Capítulo 7

Conclusões

A maioria dos dados geotécnicos de Salvador não apresentou critérios cartográficos para a locação das sondagens e das amostras para análise de parâmetros geotécnicos em laboratório. O georreferenciamento destes dados é fundamental para que se possa trabalhar com sistemas de informações geográficas.

As condições de análise que foram simuladas para a área de estudo demonstram que em condições de solo natural a área apresenta como resultado uma classificação de zona de risco baixa.

O uso de modelos matemáticos, baseado em fenômenos físicos, permite que seja calculada a variabilidade geográfica dos valores de fator de segurança para grandes áreas. Esses dados representam o início do processo de obtenção de uma carta de identificação de áreas suscetíveis a deslizamento de terra.

Esses modelos permitem que diversas simulações sejam efetuadas. Isso se dá em função de que sua implementação está relacionada com uma equação que procura representar as condições de instabilidade geotécnica. Essa é uma característica importante que o difere de modelos menos flexíveis para a predição de áreas de risco. Os cenários de suscetibilidade mudam conforme os parâmetros de simulação utilizados.

A presença da água da chuva propicia uma alteração nos parâmetros geomecânicos e conseqüentemente apresentam regiões definidas como de risco alto a risco iminente

de deslizamento. A depender da posição da frente de umedecimento a quantidade de áreas suscetíveis a deslizamento aumenta.

Apesar da formulação do método de estabilidade ser simples, obteve-se resultados satisfatórios para o objetivo pretendido deste trabalho. A metodologia proposta mostrou-se eficiente e pode ser considerada como uma boa alternativa para o planejamento urbano na definição de áreas suscetíveis a deslizamento de terra.

É conveniente o acompanhamento do histórico de previsões meteorológicas para a definição da condição de saturação e conseqüentemente previsão da profundidade da frente de umedecimento, servindo de entrada para a formulação proposta e assim definindo-se áreas prioritárias para ações mitigadoras do poder público.

Capítulo 8

Referências Bibliográficas

ALEOTTI, P. e CHOWDHURY, R. (1999) *Landslide Hazard Assessment: Summary Review and New Perspectives*. In: *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, vol. 58, p. 21 – 44.

ALMEIDA, G. A. G. e ALBRECHT, K. J. (2002) *Banco de dados digital das sondagens de simples reconhecimento (SPT): Subsídio ao planejamento urbano*. In: 10º Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia, Ouro Preto – MG. Cd-Rom.

AMARAL, C. e FIORI, A. P. (2004) *Grau de Estabilidade das Vertentes da Serra do Paruã, nas Proximidades do Falso Túnel*. In: 5º Simpósio Brasileiro de Cartografia Geotécnica e Geoambiental, São Carlos – SP, p. 164 – 172.

ARONOFF, S. (1989) *Geographic information systems: A management perspective*. WDL Publications, Ottawa, Canadá.

AYALEW, L., YAMAGISHI, H. e UGAWA, N. (2004) *Landslides Susceptibility Mapping Using GIS-Based Linear Combination, the Case in Tsugawa Área of Agano River, Niigata Prefecture, Japan*. *Landslides*, vol. 1, p. 73 – 81, SpringerLink publisher online.

BARROS, E. U. A. (1996) *Utilização do geoprocessamento no estudo de suscetibilidade à erosão na área de influência da UHE – Barra do Peixe*. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília - DF, 119p.

- BASTOS, G. e ZUQUETTE, L. (2002) *Interação entre bancos de dados e mapeamento geotécnico: Principais características e finalidades*. In: 10º Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia, Ouro Preto – MG. Cd-Rom.
- BERTAGNA, S. M. A., RIEDEL, P. S. (1999) *Elaboração de carta de suscetibilidade ao escorregamento através de Sistema de Informação Geográfica: média bacia do Rio Perequê (serra do Mar – SP)*. In: 9º Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia, ABGE, São Pedro - SP, 15p. Cd-Rom.
- BHATTARAI, P., TIWARI, B. MARUI, H. e AOYAMA, K. (2004) *Quantitative Slope Stability Mapping with ArcGIS: Prioritize High-way Maintenance*. In: ESRI Users Conference Proceedings. Disponível em: <<http://gis.esri.com/library/userconf/proc04/docs/pap1568.pdf>> acesso em 15 de março de 2004.
- BURROUGH, P. A. (1986) *Principles of geographical information systems for land resources assessment*. Clarendon Press, Oxford, 193p.
- CAMARGO, E. C. G., FELGUEIRAS, C. A. e MONTEIRO, A. (2001) *A Importância da Modelagem da Anisotropia na Distribuição Espacial de Varáveis Ambientais Utilizando Procedimentos Geoestatísticos*. In: X Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. Foz do Iguaçu – PR. p. 395 – 402. Cd-Rom.
- CAMPOS, L. E. P. (1984) *Influência na sucção na estabilidade de taludes naturais em solos residuais*. Dissertação de Mestrado, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro – RJ, 173p.
- CAMPOS, L. E. P. (2002) *Utilização de parâmetros de solos não saturados em encostas*. In: XVI Congreso Argentini de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica (CAMSIG), Argentina, Trelew. Chubut. Patagônia. CD-Rom.
- CAMPOS, L. E. P., MIRANDA, S. B., JESUS, A. C. e BURGOS, P. C. (2005) *Aplicação de Geoprocessamento de Movimento de Massa em Salvador – Ba*. In: COBRAE - IV Conferência Brasileira sobre Estabilidade de Taludes. Salvador – Bahia. p. 118 – 121.
- CHUNG, C. e FABBRI, A. G. (2002) *Modeling the conditional probability of the occurrences of future landslides in a study area characterized by spatial data*. In: Symposium on Geospatial Theory, Processing and Applications. Ottawa, Canada. Disponível em: <<http://www.isprs.org/commission4/proceedings/pdfpapers/440.pdf>> acesso em 22 de dezembro de 2004.

- CLERICI, A. (2002) *A GRASS GIS based shell script for landslides susceptibility zonation by the conditional analysis method*. In: Open Source GIS – GRASS Users Conference, Trento – Italia.
- DEARMAN, W. R. (1991) *Engineering Geological Mapping*. Butterworth e Heinemann, Oxford, 387p.
- DIAS, L. S. O., ROCHA, G. A., BARROS, E. U. A. e MAIA, P. H. P. (2004) *Utilização do Radar interferométrico para Delimitação Automática de Bacias Hidrográficas*. In: Bahia Análise e Dados, SEI - Superintendência de Estudos Econômicos e Sociais da Bahia, Salvador, vol. 14, No. 2, p. 265 – 271.
- DINIZ, N. C. (1998) *Automação da cartografia geotécnica: uma ferramenta de estudos e projetos para avaliação ambiental*. Tese de Doutorado, USP, São Paulo, 2 v..
- FELGUEIRAS, C. A. (2001) *Modelagem numérica de terreno*. In: CÂMARA, G.; DAVIS, C.; MONTEIRO, A. M. V. Introdução à Ciência da Geoinformação. Disponível em: <<http://www.dpi.inpe.br/gilberto/livro/introd/cap7-mnt.pdf>> acesso em 20 de dezembro de 2002.
- FERNANDES, N. F. e AMARAL, C. P. (1996) *Movimentos de Massa: Uma abordagem Geológico-geomorfológica*. In: GUERRA, A. J. T. e CUNHA, S. B., Geomorfologia e Meio Ambiente. Ed. Bertrand, Rio de Janeiro - RJ, p. 123 – 194.
- FERNADES DA SILVA, J. C. F. (1994) *Encostas do Salvador - uma Abordagem Sócio-Ambiental*. Dissertação de Especialização em Auditoria e Qualidade Ambiental. FUNDESP/CRA/UCSAL, Salvador, 123p.
- FORTES, L. R. G. M. (1998) *Processo de modelagem de dados em sistema de informação geográfica*. Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 211p.
- FOUMELIS, M., LEKKAS, E. e PARCHARIDIS, I. (2004) *Landslide Susceptibility Mapping by GIS-Based Qualitative Weighting Procedure in Crinth Área*. In: 10th International Congress of the Geological Society of Greece. Thessaloniki, Greece, vol. 2, p. 904 – 912.
- GOMES, R. A. T., GUIMARÃES, R. F., CARVALHO JÚNIOR, O. A. e FERNANDES, N. F. (2005) *Análise do Modelo de Previsão de Deslizamentos (Shalstab) em*

Diferentes Escalas Cartográficas. In: Solos e Rochas - Revista Latino-americana de Geotecnia, São Paulo, vol. 28, No. 1. p. 85 – 97.

GUIDICINI, G. e NIEBLE, C. M. (1976) *Estabilidade de taludes naturais e de escavação*. Edgard Blücher, Ed. Da Universidade de São Paulo, São Paulo – SP, 170p.

GUIMARÃES, R. F. (2000) *Utilização de um modelo de previsão de áreas susceptíveis a escorregamentos rasos com controle topográfico: Adequação e calibração em duas bacias de drenagem*. Tese de Doutorado, UFRJ, Rio de Janeiro, 150p.

HIGASHI, R. R., DIAS, R. D. e MARTINS, K. P. (2002) *Utilização de um SIG no desenvolvimento de um banco de dados geotécnicos do norte do estado do Rio Grande do Sul*. In: 10º Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia, Ouro Preto – MG. Cd-Rom.

INPE (2003) *Aula 3 – Registro de Imagens*. In: Tutorial do SPRING em 10 Aulas. Disponível em: <<http://www.dpi.inpe.br/spring/usuario/aula03.pdf>> acesso em 04 de maio de 2004.

JESUS, A. C., DIAS, L. S. O., MIRANDA, S. B. e CAMPOS, L. E. P. (2005a) *Avaliação da Suscetibilidade ao Risco de uma Área Piloto de Salvador*. In: COBRAE - IV Conferência Brasileira sobre Estabilidade de Taludes. Salvador – Bahia. p. 123 – 129.

JESUS, A. C., MIRANDA, S. B., DIAS, L. S., BRITO JÚNIOR, J. A., BURGOS, P. C. e CAMPOS, L. E. P. (2005b) *Contribuição para o Zoneamento das Áreas com Características Geotécnicas Semelhantes da Cidade de Salvador Visando Aplicações em Mapeamento de Risco*. In: COBRAE - IV Conferência Brasileira sobre Estabilidade de Taludes. Salvador – Bahia. p. 17 – 25.

LAIRD, J. R. (2001) *The Current State of Engineering Geology, Slope Stability and Harvest Units Plans*. In: The International Mountain Logging and 11º Pacific Skyline Symposium. Seattle – USA. Disponível em: <<http://depts.washington.edu/sky2001/proceedings/papers/Laird.pdf>> acesso em 4 de fevereiro de 2004.

LANDIM, P. M. B. (2004) *Análise Estatística de Dados Geológicos*. Editora UNESP, São Paulo, 226 p.

LIMA, M. J. A. (1979) *Prospecção geotécnica do subsolo*. Livros Técnicos e Científicos, Editora Ltda., Rio de Janeiro – RJ, 104p.

MATTOS, E. F. O., CERQUEIRA NETO, J. X., SILVA, F. R., GOMES, R. L. e OLIVEIRA, S. M. (2005a) *Crítérios de Hierarquização de Intervenções em Áreas de Risco Definidas pelo Plano Diretor de Encostas do Município de Salvador*. In: COBRAE - IV Conferência Brasileira sobre Estabilidade de Taludes. Salvador – Bahia. p. 3 – 15.

MATTOS, E. F. O., GOMES, R. L. e OLIVEIRA, S. M. (2005b) *O Plano Diretor de Encostas: Ferramenta para Gestão de Risco Associados ao Sistema de Encostas da Paisagem Urbana de Salvador*. In: COBRAE - IV Conferência Brasileira sobre Estabilidade de Taludes. Salvador – Bahia. p. 33 – 44.

MASSAD, F. (2003) *Obras de Terra: Curso Básico de Geotecnia*. Oficina de Textos, São Paulo, p. 57.

MAZZIONE, R. L. (2002) *Variabilidade Espacial de Atributos Químicos do Solo de Araguari – MG*. Dissertação de Mestrado em Agronomia. UNESP. São Paulo. 155p.

MENDES, C. A. B. e CIRILO, J. A. (2001) *Geoprocessamento em recursos hídricos. Princípios e aplicações*. Associação Brasileira de Recursos Hídricos (ABRH), Porto Alegre – RS, 533p.

NBR 11.682 (1991) *Estabilidade de Taludes*. ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, 39 p.

OCEPLAN (1981) *Encostas*. Caderno de Estudos Sócio-econômicos do Órgão Central do Planejamento da Prefeitura Municipal de Salvador. OCEPLAN – GESEC. Conteúdo: vol. 1 – Redefinindo a Questão, vol. 2 – Porque e Onde Caem, vol. 3 – O Que Fazer. Salvador.

PACK, R. T., TARBOTON, D. G. e GOODWIN, C. N. (1998) *SlnMap Stability Index Approach to Terrain Stability Hazard Mapping*. In: 8th Congress of the International Association of Engineering Geology. Vancouver, British Columbia, Canada.

PMS – Prefeitura Municipal de Salvador (1996) *Estudo sobre Áreas de Risco de Encostas de Salvador*. GETARES - Grupo de Estudos Técnicos das Áreas de Risco de Encostas de Salvador. CPM – CODESAL – PMS – UFBA – CREA - CEB. Relatório Técnico. Salvador. 45p.

- REDIVO, A. L., RAMOS, V. M. e GUIMARÃES, R. F. (2003) *Aplicação do modelo SHALSTAB para determinação de áreas susceptíveis a escorregamentos rasos na região do subúrbio ferroviário – Salvador (BA)*. In: REGEO, Porto Alegre - RS. Cd-Rom.
- REMONDO, J., BONACHEA, J. e CENDRERO, A. (2005) *A Statistical Approach to Landslide Risk Modelling at Basin Scale: from Landslide Susceptibility to Quantitative Risk Assessment*. Landslides, vol. 2, p. 321 – 328, SpringerLink publisher online.
- RIBEIRO, L. P. (1991) *Alguns Aspectos do Solo do Salvador e sua Relação com Processos de Degradação*. Sociedade e Natureza, Uberlândia – MG. p. 59 – 73.
- SAVAGE, W. Z., GODT J. W. e BAUM, R. L. (2004) *Modeling Time-dependent Slope Stability*. In: 9th International Symposium on Landslides - Landslides: Evaluation and Stabilization. Rio de Janeiro, vol. 1, p. 23 – 36.
- SCOTTON, G. C., DAL SANTO, M. A. e OLIVEIRA, F. H. (2004) *Cartografia Digital Aplicada à Análise Ambiental da Bacia Hidrográfica do Rio Biguaçu – SC*. In: COBRAC2004 – Congresso Brasileiro de Cadastro Técnico Multifinalitário. Florianópolis – SC, 15p.
- SILVA, A. B. (2003) *Sistemas de informações geo-referenciados. Conceitos e fundamentos*. Editora da UNICAMP, Campinas – SP, 236p.
- SIVAKUMAR, G. L. e MUKESH, M. D. (2002) *Landslides analysis in geographic information systems*. In: GISDEVELOPMENT THE GEOGRAPHIC INFORMATION SYSTEMS (GIS) PORTAL. 2002. Disponível em:
<http://www.gisdevelopment.net/application/natural_hazards/landslides.index.htm>
acesso em 10 de janeiro 2002.
- SUWANWIWATTANA, P., CHANTAWARANGUL, K., MAIRANG, W. e APAPHANT, P. (2001) *The development of geotechnical database of Bangkok subsoil using GRASS-GIS*. In: 22nd Asian Conference on Remote Sensing, Singapore.
- SECRETARIA DO MEIO AMBIENTE – SMA (1990) *Instabilidade da Serra do Mar no Estado de São Paulo*. Governo do Estado de São Paulo, vol 3: Conceitos básicos.
- TEIXEIRA, C. Z. (2003) *Um Estudo de viabilidade para fundações rasas de construções de pequeno porte na região de Belo Horizonte usando ferramentas SIG*.

VI Curso de Especialização em Geoprocessamento, Departamento de Cartografia, IGEO, UFMG, Belo Horizonte - MG, 72p.

VALENTE, A. L. S. (1999) *Integração de Dados por Meio de Geoprocessamento, para a Elaboração de Mapas Geotécnicos, Análise do Meio Físico e Suas Interações Com a Mancha Urbana: O Caso de Porto Alegre (RS)*. Tese de Doutorado, UFRGS, Rio Grande do Sul. 1v, 391p.

VALENTE, A. L. S. (2000) *Proposta metodológica de um banco de dados geotécnicos para uso em sistemas de informações geográficas (SIG) e sua aplicação no município de Porto Alegre, RS*. Teoria e Prática na Engenharia Civil, No. 1, p. 87-95.

VAN WESTEN, C. J. (2000) *The Modelling of Landslide Hazard Using GIS*. Surveys in Geophysics, vol. 21, p. 241 – 255, SpringerLink publisher online.

VIANA, F. R., LIMA, D. C. de, MARTINS, P. P., COSTA, L. M e MARQUES, E. A. G. (2002) *Análises Paramétricas e Estatísticas de Dados Geotécnicos da Bacia das Codornas – MG*. In: 10º Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia, Ouro Preto – MG. Cd-Rom.

WILSON, J. P. e GALLANT, J. C. (2000) *Digital Terrain Analysis*. In: *Terrain Analysis: Principles and Applications*. John Wiley and Sons Inc. New York Chapter 1, 28p.

WOLLE, C. M. (1980) *Taludes Naturais - Mecanismos de Instabilização e Critérios de Segurança*. Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo. 1 v.

WOLSKI, M. S., ORTH, D. M e DIAS, R D (1998) *Contribuição à cartografia geotécnica de grandes áreas com o uso de sistemas de informações geográficas: Uma aplicação à região do médio Uruguai (RS)*. In: COBRAC 98 – Congresso Brasileiro de Cadastro Técnico Multifinalitário. UFSC, Florianópolis, SC. Disponível em: <<http://geodesia.ufsc.br/Geodesia-online/arquivo/cobrac98/039/039.htm>> acesso em 25 de maio de 2004.

ZAITCHIK, B. F. e VAN ES, H. M. (2003) *Applying a GIS Slope-stability Model to Site-specific Landslides Prevention in Honduras*. Journal of Soil and Water Conservation, vol. 58, No. 1. <http://www.swcs.org/t_pubs_journal_JanFeb2003_applying.htm> acesso em 25 de maio de 2004.

ZHOU, G, ESAKI, T., MINATI, Y., XIE, M. e MORI, J. (2003) *Spatial Probabilistic Modeling of Slope Failure Using an Integrated GIS Monte Carlo Simulation Approach*. Engineering Geology, vol 68, Issues 3 - 4, p. 373 - 386.

ZUQUETTE, L. V. (1987) *Análise crítica da cartografia geotécnica e proposição metodológica para condições brasileiras*. Tese de Doutorado, EESC/USP, São Carlos, SP, 637p., 3 v..

Livros Grátis

(<http://www.livrosgratis.com.br>)

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)
[Baixar livros de Matemática](#)
[Baixar livros de Medicina](#)
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)
[Baixar livros de Meteorologia](#)
[Baixar Monografias e TCC](#)
[Baixar livros Multidisciplinar](#)
[Baixar livros de Música](#)
[Baixar livros de Psicologia](#)
[Baixar livros de Química](#)
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)
[Baixar livros de Serviço Social](#)
[Baixar livros de Sociologia](#)
[Baixar livros de Teologia](#)
[Baixar livros de Trabalho](#)
[Baixar livros de Turismo](#)