

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

**ANÁLISE DA RELAÇÃO CHUVA-ESCORREGAMENTOS EM
REGIÕES TROPICAIS MONTANHOSAS URBANAS, CASO
DE ESTUDO RIO DE JANEIRO, BRASIL**

GEORGE FERNANDES AZEVEDO

ORIENTADOR: HERNÁN E. MARTÍNEZ CARVAJAL
CO-ORIENTADOR: NEWTON MOREIRA DE SOUZA

DISSERTAÇÃO MESTRADO EM GEOTECNIA

PUBLICAÇÃO: G.DM – 198/11

BRASÍLIA / DF: SETEMBRO / 2011

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**ANÁLISE DA RELAÇÃO CHUVA-ESCORREGAMENTOS EM
REGIÕES TROPICAIS MONTANHOSAS URBANAS, CASO
DE ESTUDO RIO DE JANEIRO, BRASIL**

GEORGE FERNANDES AZEVEDO

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E
AMBIENTAL DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS
NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE.**

APROVADA POR:

**HERNÁN EDUARDO MARTÍNEZ CARVAJAL, D.S.c. (UnB)
(ORIENTADOR)**

**GREGÓRIO LUIS SILVA ARAÚJO, D.S.c. (UnB)
(EXAMINADOR INTERNO)**

**MAURICIO EHRLICH, D.S.c. (UFRJ)
(EXAMINADOR EXTERNO)**

DATA: BRASÍLIA/DF, 27 de setembro de 2011.

FICHA CATALOGRÁFICA

| | |
|---|---------------------------------|
| AZEVEDO, GEORGE FERNANDES | |
| Análise da Relação Chuva-Escorregamentos em Regiões Tropicais Montanhosas Urbanas, Caso de Estudo Rio de Janeiro, Brasil. | |
| xvi, 120 p., 297 mm (ENC/FT/UnB, Mestre, Geotecnia, 2011) | |
| Dissertação de Mestrado - Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia. | |
| Departamento de Engenharia Civil e Ambiental | |
| 1. Movimentos de Massa | 2. Relação chuva-escorregamento |
| 3. Sistemas de Informação Geográfica | 4. Estabilidade de encostas |
| I. ENC/FT/UnB | II. Título (série) |

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

AZEVEDO, G.F. (2011). Análise da Relação Chuva-Escorregamentos em Regiões Tropicais Montanhosas Urbanas, Caso de Estudo Rio de Janeiro, Brasil. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM - 198/11, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 120 p.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: George Fernandes Azevedo

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO: Análise da Relação Chuva-Escorregamentos em Regiões Tropicais Montanhosas Urbanas, Caso de Estudo Rio de Janeiro, Brasil.

GRAU / ANO: Mestre / 2011.

É concedida à Universidade de Brasília a permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

George Fernandes Azevedo
SGAN 912 Mod. C, Bloco F, Apto. 21
Brasília – DF

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, por ter me proporcionado esta oportunidade de crescimento pessoal e acadêmico. Por ter me dado entusiasmo, sabedoria e perseverança para transpor as muitas dificuldades encontradas nessa longa jornada e por ter concedido a benção de chegar até aqui com saúde.

Aos meus pais, por todo o esforço, incentivo e amor dispensados a mim. Por acreditarem no meu potencial e terem dedicado seu tempo, seus recursos e suas forças para que esse objetivo fosse realizado. À minha esposa, pelo amor, companheirismo e pela extraordinária ajuda nos momentos mais difíceis. Pelas palavras de carinho e por se importar comigo. Amo vocês e espero poder retribuir-lhes tudo o que fizeram por mim.

Ao meu orientador, professor Hernán Carvajal, pelo seu grande apoio, por ter acreditado na minha capacidade para a realização deste trabalho e pelo incentivo nos momentos de desânimo. Ao meu co-orientador, professor Newton Moreira, pela sua fundamental ajuda e colaboração ao longo da pesquisa.

Ao professor Renato Pinto da Cunha, por ter intermediado e facilitado as visitas aos órgãos competentes na cidade do Rio de Janeiro. Ao colega Jorge Esteban, pela grande ajuda com as minhas recorrentes dúvidas e pelas impressões ao longo da pesquisa.

Aos professores Maurício Ehrlich, Willy Lacerda e Cláudio Fernando Mahler, da UFRJ, e ao professor Alberto Sayão, da PUC-Rio, pela atenção dispensada a mim e pelas valiosas informações concedidas durante minha visita às suas instituições.

À Fundação Geo-Rio, pelo grande apoio dos seus competentes profissionais a esta pesquisa através do fornecimento das informações imprescindíveis para o seu desenvolvimento e da solicitude com que me atenderam. Ao Instituto Pereira Passos e a Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais, pelos dados fornecidos.

À CNPQ, pelo apoio financeiro.

A todos que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho, meus sinceros agradecimentos.

RESUMO

A natureza potencialmente desastrosa conferida aos movimentos de massa é ressaltada em ambientes tropicais montanhosos, de forma que, em áreas sujeitas à ocorrência de escorregamentos, a ação da precipitação assume um papel importante na deflagração destes acidentes.

A cidade do Rio de Janeiro apresenta atributos físicos que permitem o desenvolvimento de deslizamentos em encostas, sendo que a morfologia acidentada e a ocupação desordenada destas encostas pela população provocam a alteração do meio natural, proporcionando uma maior susceptibilidade aos eventos de escorregamentos durante intensas precipitações.

O presente trabalho buscou estudar a relação existente entre os eventos de escorregamentos e a chuva acumulada deflagradora destes acidentes, tomando-se em consideração os fatores de distribuição espacial e temporal, tanto da precipitação quanto dos deslizamentos. Para tanto, utilizaram-se dados de chuvas e de escorregamentos relativos ao período de 1998 a 2002, provenientes da Fundação Geo-Rio, além das informações cartográficas do município do Rio de Janeiro.

A metodologia baseou-se na depuração e tratamento das informações por meio de ferramentas computacionais, obtendo-se a definição das áreas de influência de chuvas para cada estação pluviométrica dentro de uma área piloto. Cada registro de acidente selecionado foi vinculado a um determinado posto de registro de precipitação, sendo possível calcular o acumulado de chuva associado a um período de tempo específico utilizados pela Fundação Geo-Rio. Com o uso dos Sistemas de Informação Geográfica, foi possível a incorporação de características do meio físico nas análises.

Como resultado, houve o estabelecimento de curvas para os diversos grupos de estações, relacionando probabilidade de ruptura e precipitação acumulada. As diferentes configurações destas representações, em se tratando de forma e do valor previsto para a probabilidade de ruptura, permitem inferir comportamentos distintos perante um determinado acumulado pluviométrico relacionado a certo intervalo de tempo, fato explicado pelas características inerentes a cada região estudada.

ABSTRACT

The potentially disastrous nature of mass movements is highlighted in mountainous tropical environments, because of that in areas with occurrence of landslides, the action of rainfall plays an important role in the initiation of these accidents.

The city of Rio de Janeiro has physical attributes that allow the development of landslides on slopes. In addition, the morphology of these rugged hills is strongly affected by uncontrolled occupation that causes changes in the natural environment, providing a greater susceptibility to landslide event during intense rainfall.

This work aimed to study the relationship between the landslides and the triggered precipitation events, taking into consideration the factors of both spatial and temporal distribution of rainfall and landslides. To this end, data of rainfall and landslides for the period 1998-2002 from Geo-Rio Foundation and the map information of the municipality of Rio de Janeiro were used.

The methodology was based on the purification and treatment of information by means of computational tools, resulting in the definition of areas of influence of rainfall for each rainfall station within a pilot area. Each landslide record selected was tied to a particular set of rainfall, variable, in order to calculate the accumulated rainfall associated with a specific time period used by the Geo-Rio Foundation. With the use of Geographic Information Systems, it was possible to incorporate the conditioning characteristics of the terrain to improve the cause-effect analysis.

As a result, it was possible to obtain a set of curves that show the relationship between the likelihood of rupture and the triggering rainfall in different areas associated to specific precipitation gauges into the pilot area. Different configurations of these curves allows to infer distinct behavior of the slopes when subjected to a certain cumulative rainfall. This is explained by the inherent physical characteristics of each sub-area into the pilot area studied.

ÍNDICE

| | |
|--|------|
| AGRADECIMENTOS | iv |
| RESUMO..... | vi |
| ABSTRACT..... | vii |
| ÍNDICE..... | viii |
| LISTA DE TABELAS..... | xi |
| LISTA DE FIGURAS | xiii |
| LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURA E ABREVIACÕES | xv |
| 1 INTRODUÇÃO | 1 |
| 1.1 OBJETIVOS DA PESQUISA | 2 |
| 1.1.1 OBJETIVO GERAL | 2 |
| 1.1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS | 2 |
| 1.2 ESCOPO DO TRABALHO..... | 3 |
| 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 4 |
| 2.1 MOVIMENTOS DE MASSA DEFLAGRADOS POR EVENTOS DE CHUVAS ... | 4 |
| 2.1.1 ANÁLISE GERAL DOS TIPOS DE MOVIMENTOS DE MASSA | 4 |
| 2.1.2 CAUSAS E AGENTES DETERMINANTES NA OCORRÊNCIA DOS MOVIMENTOS DE MASSA | 8 |
| 2.1.3 EVOLUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DOS MOVIMENTOS DE MASSA PROVOCADOS POR CHUVAS | 9 |
| 2.1.4 VARIÁVEIS ENVOLVIDAS NOS MOVIMENTOS DE MASSA OCORRIDOS PELA AÇÃO DA PRECIPITAÇÃO..... | 11 |
| 2.1.5 EVOLUÇÃO DOS RISCOS GEOLÓGICOS ENVOLVENDO A CIDADE DO RIO DE JANEIRO..... | 14 |
| 2.2 LIMITES CRÍTICOS DE CHUVA | 15 |
| 2.2.1 ABORDAGENS DA CORRELAÇÃO ENTRE PRECIPITAÇÃO E DESLIZAMENTOS..... | 16 |
| 2.2.2 EXPERIÊNCIA MUNDIAL NA DEFINIÇÃO DE LIMIARES | 17 |

| | | |
|-------|---|-----|
| 2.2.3 | ESTUDOS NACIONAIS SOBRE LIMIARES PLUVIOMÉTRICOS | 23 |
| 2.3 | SISTEMAS DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA..... | 35 |
| 2.3.1 | GEOPROCESSAMENTO | 35 |
| 2.3.2 | CARACTERÍSTICAS DE UM SIG..... | 36 |
| 2.3.3 | ESTRUTURA DE UM SIG..... | 37 |
| 2.3.4 | TIPOS DE DADOS | 37 |
| 2.3.5 | ESTRUTURA E MODELAGEM DOS DADOS GEOGRÁFICOS..... | 41 |
| 3 | GENERALIDADES SOBRE A ÁREA DE ESTUDO..... | 42 |
| 3.1 | LOCALIZAÇÃO E CARACTERÍSTICAS DA ÁREA DE ESTUDO | 42 |
| 3.2 | GEOLOGIA..... | 44 |
| 3.3 | GEOMORFOLOGIA | 48 |
| 4 | METODOLOGIA | 51 |
| 4.1 | ORGANIZAÇÃO DE DADOS | 51 |
| 4.1.1 | AQUISIÇÃO DE DADOS..... | 52 |
| 4.1.2 | DEPURAÇÃO E ARRANJO DOS DADOS | 54 |
| 4.2 | ANÁLISES DA RELAÇÃO ENTRE ACIDENTES E PRECIPITAÇÃO | 66 |
| 4.3 | ANÁLISE DOS ATRIBUTOS ESPACIAIS..... | 79 |
| 5 | RESULTADOS | 81 |
| 5.1 | DISTRIBUIÇÃO DOS MOVIMENTOS DE MASSA..... | 81 |
| 5.2 | CURVAS DE PROBABILIDADE DE RUPTURA | 87 |
| 5.3 | ANÁLISE DE COMPONENTES PRINCIPAIS | 95 |
| 6 | CONCLUSÕES | 98 |
| 6.1 | CONCLUSÕES SOBRE A DISTRIBUIÇÃO DOS ACIDENTES | 98 |
| 6.2 | CONCLUSÕES SOBRE AS CURVAS DE PROBABILIDADE DE RUPTURA...98 | |
| 6.3 | CONCLUSÕES SOBRE A ANÁLISE ESPACIAL..... | 100 |
| 6.4 | CONCLUSÕES SOBRE A METODOLOGIA UTILIZADA | 100 |
| 6.5 | SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS | 101 |

| | |
|---------------------------------------|-----|
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 102 |
| APÊNDICE A – LISTA DE ACIDENTES | 109 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 2.1- Resumo da classificação dos movimentos de massa (Varnes, 1978 citado por García, 2004). | 5 |
| Tabela 2.2 – Classificação das diferentes tipologias dos acidentes segundo a Geo-Rio (Feijó et al., 2004). | 7 |
| Tabela 2.3 – Classificação dos escorregamentos segundo Tatizana et al. (1987a,b). | 26 |
| Tabela 2.4 – Classificação dos eventos de escorregamentos por ocorrência (Almeida & Nawazawa, 1991 citado por Pedrosa, 1994). | 27 |
| Tabela 2.5 – Critérios de alerta de risco de escorregamentos para área urbana de Petrópolis (Almeida & Nawazawa, 1991 citado por Pedrosa, 1994). | 28 |
| Tabela 2.6 - Valores propostos para CPC relacionados a deslizamentos segundo Cerri (1993). | 29 |
| Tabela 2.7 – Valores de intensidade horária potencial segundo Cerri (1993). | 30 |
| Tabela 2.8 – Definição de classes para eventos pluviométricos (d’Orsi et al., 2002). | 34 |
| Tabela 4.1 – Registro de acidente geotécnico pertencente à Geo-Rio (d’Orsi, 2002). | 52 |
| Tabela 4.2 – Definição de intervalos de classes para declividade. | 56 |
| Tabela 4.3 – Definição de intervalos de classes para hipsometria. | 57 |
| Tabela 4.4 – Distribuição de deslizamentos por estações pluviométricas na área piloto. | 58 |
| Tabela 4.5 – Distinção entre eventos com data e localização definidas e eventos somente com data registrada. | 60 |
| Tabela 4.6 – Estações e seus respectivos postos mais próximos para substituição de dados ausentes. | 62 |
| Tabela 4.7 – Organização dos dados de escorregamentos com localização e data definidas para a estação Saúde. | 64 |
| Tabela 4.8 – Dados de escorregamentos da estação Saúde com as alterações de horário e data. | 64 |
| Tabela 4.9 – Escorregamentos relativos à estação Saúde com as horas calculadas acrescentadas. | 65 |
| Tabela 4.10 – Níveis de alerta para escorregamentos do sistema Alerta Rio. | 66 |
| Tabela 4.11 – Definição do nível baixo de ocorrência de deslizamentos. | 67 |
| Tabela 4.12 – Número de escorregamentos para cada estação, agrupados por níveis de alerta referentes ao acumulado pluviométrico de 1 hora. | 67 |

| | |
|--|-----|
| Tabela 4.13 – Número de escorregamentos para cada estação agrupados por níveis de alerta referentes ao acumulado pluviométrico de 24 horas. | 68 |
| Tabela 4.14 – Número de escorregamentos para cada estação, agrupados por níveis de alerta referentes ao acumulado pluviométrico de 96 horas. | 69 |
| Tabela 4.15 – Configuração das estações pluviométrica após a união dos dados de escorregamentos. | 71 |
| Tabela 4.16 – Distribuição de escorregamentos teóricos em relação ao acumulado de 1 hora. | 72 |
| Tabela 4.17 – Distribuição de escorregamentos teóricos em relação ao acumulado de 24 horas. | 73 |
| Tabela 4.18 – Resultados das probabilidades de ruptura em relação aos níveis de alerta para o conjunto formado pelas estações Cidade de Deus e Tanque, relativos à chuva acumulada horária. | 75 |
| Tabela 4.19 – Resultados das probabilidades de ruptura em relação aos níveis de alerta para o conjunto formado pelas estações Cidade de Deus e Tanque, relativos à chuva acumulada diária. | 75 |
| Tabela 4.20 – Pontos com coordenadas representando precipitação acumulada média em mm (pa) e probabilidade de ruptura (pr) para cada nível de alerta referente ao acumulado de chuvas horário. | 76 |
| Tabela 4.21 – Pontos com coordenadas representando precipitação acumulada média em mm (pa) e probabilidade de ruptura (pr) para cada nível de alerta referente ao acumulado de chuvas diário. | 77 |
| Tabela A.1 - Registros de deslizamentos com horário definido nos relatórios da Fundação Geo-Rio. | 110 |
| Tabela A.2 - Registros de deslizamentos com horários estimados (horários sob o formato de minutos decorridos a partir da meia-noite do dia de ocorrência do acidente). | 117 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 2.1 - Principais tipos de movimentos de massa (Van Westen, 2003 citado por García, 2004). | 6 |
| Figura 2.2 - Escala de velocidades para a caracterização dos movimentos de massa segundo Varnes (1978) citado por Oliveira (2004). | 6 |
| Figura 2.3 - Limiares pluviométricos propostos em nível mundial e para Porto Rico (Pando et al., 2004). | 22 |
| Figura 2.4 – Carta de periculosidade do Rio de Janeiro (RJ) (Guidicini & Iwasa, 1976). | 24 |
| Figura 2.5 – Envoltória de escorregamentos induzidos com relativos ao posto pluviométrico Curva da Onça (Tatizana et al., 1987a). | 26 |
| Figura 2.6 - Envoltória para precipitação acumulada de 2 dias antecedentes com a precipitação acumulada de 24 horas (Soares, 2006). | 32 |
| Figura 2.7 - Gráfico de chuva horária pela chuva acumulada de 96 horas com a representação dos eventos de precipitação para o ano de 1999 (d’Orsi et al., 2000). | 34 |
| Figura 2.8 - Gráfico de chuva acumulada de 24 horas pela chuva acumulada de 96 horas com a representação dos eventos de precipitação para o ano de 1999 (d’Orsi et al., 2000). | 35 |
| Figura 2.9 – Representação da organização de dados em planos de informação (Pina & Santos, 2000). | 38 |
| Figura 2.10 – Exemplo de mapa temático de uso do solo (García, 2004). | 39 |
| Figura 2.11 - Exemplo de modelo numérico do terreno composto por isolinhas de topografia (Câmara & Monteiro, 2001). | 40 |
| Figura 2.12 – Exemplo de imagem para a região de Manaus (Câmara & Monteiro, 2001). | 41 |
| Figura 3.1 – Localização do município do Rio de Janeiro e municípios adjacentes (Ministério da Saúde, 2005). | 42 |
| Figura 3.2 – Localização dos compartimentos geomorfológicos do município do Rio de Janeiro (Fernandes, 1998 citado por Fernandes et al., 2006). | 48 |
| Figura 4.1 – Registros de escorregamentos localizados espacialmente. | 55 |
| Figura 4.2 – Área piloto de estudo. | 56 |
| Figura 4.3 – Áreas de influência modificadas das estações para a área piloto de estudo. | 58 |
| Figura 5.1 – Distribuição de deslizamentos reais por estações pluviométricas pertencentes à área piloto. | 81 |
| Figura 5.2 – Distribuição em relação aos postos pluviométricos dos acidentes com localização e dados temporais precisos pertencentes à área piloto. | 82 |

| | |
|--|----|
| Figura 5.3 – Distribuição dos acidentes em relação às unidades geológico-geotécnicas. | 83 |
| Figura 5.4 – Detalhe do posicionamento de alguns acidentes vinculados à classe quaternária. | 84 |
| Figura 5.5 – Distribuição dos acidentes em relação ao uso do solo. | 85 |
| Figura 5.6– Distribuição dos acidentes em relação às classes de declividade. | 86 |
| Figura 5.7 – Distribuição dos acidentes em relação às classes de hipsometria. | 87 |
| Figura 5.8 – Curvas de probabilidade de ruptura contra precipitação acumulada de 1 hora. | 88 |
| Figura 5.9 – Curvas de probabilidade de ruptura contra precipitação acumulada de 1 hora que apresentam formas similares. | 89 |
| Figura 5.10 – Curvas distintas de probabilidade de ruptura contra precipitação acumulada de 1 hora. | 90 |
| Figura 5.11 – Curvas de probabilidade de ruptura contra precipitação acumulada de 24 horas. | 91 |
| Figura 5.12 – Curvas de probabilidade de ruptura contra precipitação acumulada de 24 horas agrupadas que apresentam comportamento próximo. | 92 |
| Figura 5.13 – Curvas de probabilidade de ruptura, referentes à precipitação acumulada de 24 horas que apresentam pico. | 93 |
| Figura 5.14 – Curvas comparativas de probabilidade de ruptura referentes à precipitação acumulada de 1 hora. | 94 |
| Figura 5.15 – Curvas comparativas de probabilidade de ruptura referentes à precipitação acumulada de 24 horas. | 94 |
| Figura 5.16 – Diagrama de Pareto mostrando a distribuição da variabilidade pelas componentes principais. | 96 |
| Figura 5.17 – Representação das componentes principais e suas variáveis. | 96 |

LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURA E ABREVIACÕES

AC4d: quantidade de chuva acumulada referente aos 4 dias anteriores ao evento

ACi: precipitação acumulada em determinada hora “i”

CCM: coeficiente de ciclo móvel

CPC: coeficiente de precipitação crítica

CPCef: coeficiente de precipitação crítica efetivo

CPCpot: coeficiente de precipitação crítica potencial

C: Corrida

dwg: extensão de arquivos de desenhos nativa do software AutoCAD

D: duração da chuva em horas

EL/E: Escorregamentos de lixo/entulho

EM-DAT: Emergency Events Database

ER/en: Escorregamento de rocha em encosta natural

ER/tc: Escorregamento de Rocha em talude de corte

ES/en: Escorregamento de solo em encosta natural

ES/tc: Escorregamento de solo em talude de corte

ES/R/en: Escorregamento de solo/rocha em encosta natural

ES/R/tc: Escorregamento de solo/rocha em talude de corte

ET: Escorregamentos de talús

Geo-Rio: Fundação Instituto de Geotécnica do Município do Rio de Janeiro

GPE: Gerência de Programas Especiais

°: graus

h: hora

I: intensidade da chuva em milímetros por hora

I(AC): intensidade de chuva horária

Ici: intensidade horária crítica para a ocorrência de deslizamentos induzidos

Ii: intensidade de chuva horária em mm/h medida na hora i

INPE: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

Ipi: intensidade horária potencial

IPP: Instituto Pereira Passos

K: parâmetro condicionado às condições geotécnicas da encosta, a intensidade dos escorregamentos e ao modelo de ruptura

km²: quilômetros quadrados

m: metros
m³: metros cúbicos
mm: milímetros
mm/h: milímetros por hora
mm/24h: milímetros por vinte e quatro horas
m/s: metros por segundo
MNT: modelo numérico do terreno
' : minutos
min: minutos
pa: ponto médio da precipitação acumulada em mm
PE/A: Processos erosivos/assoreamento
pr: probabilidade de ruptura
Q/R: Queda/rolamento de blocos ou lascas rochosos
RA: Ruptura de aterro
REC: Ruptura de estrutura de contenção
“: segundos
SIG: Sistemas de Informação Geográfica
S: Sul
W: Oeste

1 INTRODUÇÃO

Os desastres naturais têm aumentado substancialmente nas últimas décadas, não apenas no que se refere à frequência e a intensidade, mas também em relação aos danos e prejuízos causados por estes eventos, sendo que tal acréscimo, conforme indicam alguns estudos, encontra-se atrelado a mudanças climáticas globais (Marcelino, 2007).

Segundo García (2004), as catástrofes tomam proporções sem precedentes com o advento da concentração das populações nos grandes centros urbanos, fato que vem ocorrendo nos últimos séculos.

Apesar das inundações e terremotos se apresentarem como os desastres naturais mais catastróficos, pode-se imputar aos movimentos de massa respeitáveis danos socioeconômicos, muito mais proeminentes do que geralmente se acredita (Marcelino, 2007).

Os movimentos de massa configuram-se como eventos de caráter potencialmente desastroso, principalmente em zonas tropicais e montanhosas, uma vez que a susceptibilidade do terreno em desencadear estas formas de processo aumenta em função de suas características fisiológicas e atividades antrópicas (Schuster, 1996 citado por Zapata, 2010). Estes tipos de eventos provocam, a cada ano, perdas econômicas e humanas em todos os países, sendo que o impacto destes episódios varia em função das condições geológicas locais e da vulnerabilidade social e econômica (Alcántara-Ayala, 2002).

No Brasil, segundo dados do EM-DAT (Emergency Events Database) os escorregamentos configuram-se como o segundo tipo mais frequente de desastres naturais, sendo inferiores apenas às inundações (Marcelino, 2007).

Na cidade do Rio de Janeiro, que apresenta riscos geológicos atrelados às suas características morfológicas e onde elevações abruptas emergem da planície litorânea, a ocupação desordenada das encostas modificou o perfil destes riscos geológicos no município, de forma que a ação antrópica começou a predominar em detrimento às causas de acidentes naturais (Fundação Geo-Rio, 2005). O entendimento da distribuição e das condicionantes dos desastres naturais apresenta-se como condição fundamental para o encaminhamento das soluções do problema que afeta toda a cidade (Amaral, 1997).

Segundo Souza (2004), a população se estabelece em várias regiões próximas às encostas durante o processo de crescimento das grandes cidades, de maneira que esta ocupação desordenada promove a modificação dos aspectos físicos relacionados ao ambiente natural. Novas configurações dos terrenos íngremes são impostas em decorrência da alteração

deste meio físico, tornando estas áreas susceptíveis à ocorrência de acidentes geotécnicos durante chuvas intensas.

Planejamento efetivo e medidas corretivas propiciam que as perdas econômicas e sociais causadas por movimentos de massa sejam reduzidas (Dai et al., 2002). Bradd (1993) citado por García (2004) ressalta que, caso os problemas em zonas susceptíveis sejam identificados desde o começo, poder-se-ia evitar 90% das perdas.

Nesse sentido, conforme Moreno et al. (2006), os episódios de precipitações que atuam como agentes desencadeadores de deslizamentos vêm sendo muito estudados na literatura especializada, de maneira que vários autores têm reconhecido a importância da hidrogeologia na zonificação por risco de deslizamentos.

Este trabalho teve como foco estudar a influência da precipitação nos fenômenos de movimentos de massa no município do Rio de Janeiro, investigando nas análises a influência e susceptibilidade imposta por características inerentes à área de estudo.

A identificação de limites críticos de precipitação, em associação com as previsões de chuvas e monitoramento em tempo real, tem sido introduzida nos últimos anos como uma parte integrante dos sistemas de previsão e alerta de riscos de deslizamentos, de forma que tais sistemas configuram-se como opções práticas e eficientes para a prevenção de desastres.

Uma vez determinadas relações robustas entre chuvas e deslizamentos, valendo-se também de fatores condicionantes, permitirá a geração de critérios fortemente fundamentados que, uma vez incorporados a um sistema de alerta, permitirão que estes últimos apresentem uma precisão maior, quanto à ocorrência de acidentes.

1.1 OBJETIVOS DA PESQUISA

1.1.1 OBJETIVO GERAL

Desenvolver uma metodologia capaz de analisar de maneira espacial as informações de chuvas, com o intuito de utilizá-la no estudo dos acidentes deflagrados por precipitações.

1.1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Estabelecer a probabilidade de ocorrência de movimentos de massa dentro de unidades específicas referentes às áreas de influência das estações pluviométricas, definindo ainda as curvas de probabilidade de ruptura em relação à precipitação acumulada;
- Obter a importância relativa de fatores envolvidos e aqueles que se destacam na explicação do fenômeno;

- Criar uma metodologia que possa ser desenvolvida em qualquer outro ambiente montanhoso e que permita a inserção de dados novos;
- Gerar conclusões úteis, sobretudo, para a região de estudo, de forma que estas sejam passíveis de serem incorporadas e tragam melhorias ao aparato técnico existente.

1.2 ESCOPO DO TRABALHO

A dissertação encontra-se dividida em seis capítulos, somando-se ainda as referências bibliográficas. O primeiro capítulo contextualiza o tema a ser versado no trabalho, mostrando sua relevância e motivação, bem como na exposição dos objetivos a serem alcançados.

A revisão bibliográfica está explicitada no segundo capítulo, sendo composta pelas definições gerais de movimentos de massa, juntamente com suas classificações e seus aspectos mais importantes, dando-se ênfase para as ocorrências deflagradas por precipitações.

Os principais trabalhos e estudos focados no estabelecimento da relação entre deslizamentos e precipitação presentes na literatura técnica também se encontram retratados neste capítulo, destacando-se tanto a experiência a nível mundial da obtenção de limiares de chuva determinantes de acidentes, quanto às pesquisas desenvolvidas nacionalmente.

Ainda na revisão bibliográfica, algumas características e atributos dos sistemas de informação geográfica são abordados, citando-se também sua importância no tratamento e georreferenciamento de dados espaciais.

A descrição das características gerais da área de estudo é realizada no capítulo 3, situando-a do ponto de vista geográfico e natural. No quarto capítulo, os procedimentos metodológicos utilizados na depuração, manipulação e tratamento dados utilizados na pesquisa são mencionados e explicados de maneira detalhada.

Os resultados provenientes das análises desenvolvidas constam no quinto capítulo, trazendo também as principais discussões em relação aos dados obtidos.

Finalizando, as conclusões e recomendações para novos trabalhos encontram-se no sexto capítulo.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 MOVIMENTOS DE MASSA DEFLAGRADOS POR EVENTOS DE CHUVAS

A relevância atribuída aos movimentos de massa evidencia-se pelo fato de tais elementos se constituírem como agentes atuantes no processo de evolução das encostas e pelas consequências de cunho econômico e social resultantes dos processos de risco a eles atrelados (Penha, 2000b). Esta seção tem por objetivo destacar as principais características e classificações dos movimentos de massa, estabelecendo as suas prováveis causas juntamente com a descrição do seu mecanismo de desenvolvimento, de maneira a exprimir a ação da pluviosidade neste cenário.

2.1.1 ANÁLISE GERAL DOS TIPOS DE MOVIMENTOS DE MASSA

Segundo Infanti Júnior & Fornasari Filho (1998), as paisagens são compostas por vertentes ou encostas, cujas formas e declividades se apresentam de maneira muito diversa, de modo que as alterações impostas às formas destas encostas estão ligadas aos processos dominantes de intemperismo, erosão e escorregamentos. Conforme Bloom em 1988 citado Infanti Júnior & Fornasari Filho (1998), as encostas tendem a mudar frequentemente, visando um estado central compatível com o equilíbrio em relação aos processos nelas atuantes, com o intuito de obter um arranjo mais eficiente possível. Desta forma, dentre outros fatores, a configuração de declividade e a evolução morfológica constituem-se como elementos decisivos para ocorrência de movimentos de massa (Hutchinson, 1995; Brunsden, 2002; Griffiths et al., 2002).

Como definição para movimento de massa, pode-se considerar aquela proposta por Cruden (1991), a qual o define como o movimento de um material composto de rocha, solo ou detritos ao longo de uma encosta. Apoiando-se na definição anterior, há, portanto, uma gama de eventos que podem ser classificados como movimentos de massa.

Diante disto, surgiram diversas classificações que contemplam a combinação de critérios básicos como direção, velocidade e recorrência dos deslocamentos, geometria das massas movimentadas, modalidade de deformação do movimento e o tipo do material instabilizado (Augusto Filho & Virgili, 1998). Varnes (1978) propôs uma classificação aceita internacionalmente e que leva em consideração os critérios baseados na natureza do material e no tipo de movimento. A Tab. 2.1 representa os tipos de movimentos de massa segundo esta classificação.

Tabela 2.1- Resumo da classificação dos movimentos de massa (Varnes, 1978 citado por García, 2004).

| Tipo de Movimento | Tipo de Material | | |
|---------------------------------|--|--------------------------------|------------------------|
| | Rocha | Solos | |
| | | Predominantemente grosso | Predominantemente fino |
| Quedas | Queda de blocos | Queda de detritos | Queda de solo |
| Tombamentos | De rocha | De detritos | De solo |
| Deslizamentos (Escorregamentos) | Rotacionais de rocha | Rotacionais de rocha e solo | Rotacionais de solo |
| | Translacionais de rocha | Translacionais de rocha e solo | Translacionais de solo |
| Expansões laterais | De rocha | De detritos | De solo |
| Fluxos (Escoamentos) | Rastejo de rochas (creep) | Rastejos e corridas | |
| Complexos | Combinação de dois ou mais tipos de movimentos | | |

Os conceitos atribuídos a Infanti Júnior & Fornasari Filho (1998) podem servir como definição para alguns dos movimentos de massa citados na Tab. 2.1. Desta maneira, os referidos autores propõem que a queda de blocos envolve materiais rochosos com volume e litologia variada, separando-se de encostas ou taludes íngremes e desenvolvendo movimento de queda livre. O tombamento de blocos é caracterizado pela rotação de blocos rochosos, sendo que este tipo de movimento é determinado em estruturas geológicas no maciço rochoso que apresentam grande mergulho. Um movimento descendente, lento e contínuo de massa de solo de um talude denomina-se rastejo, ao passo que movimentos gravitacionais de massas de grandes dimensões, deslocando-se na forma de escoamento rápido são considerados corridas. Conforme García (2004), o movimento que prevalece nas expansões laterais corresponde ao acomodamento lateral por fraturas de cisalhamento ou tensão.

Mais especificamente, com relação ao termo escorregamento, Terzaghi (1960) citado por Silva (2006), afirma que tais eventos podem ser compreendidos de maneira a configurar um deslocamento rápido de um material constituído por uma massa de rocha, solo residual ou sedimentos existentes em uma encosta, possuindo um centro de gravidade que se desenvolve seguindo para frente e para baixo. A definição para escorregamentos proposta por Guidicini & Nieble (1984) corrobora com aquela mostrada acima, destacando que estas ocorrências se apresentam como movimentos rápidos de massa de terrenos, geralmente bem definidas no que se refere ao volume, apresentando curta duração, de forma que o centro de gravidade se desloque para baixo e para fora do talude. Infanti Júnior & Fornasari Filho (1998) afirmam que nas encostas serranas brasileiras os processos de escorregamentos possuem grande

frequência de forma a envolver solos superficiais, alcançando usualmente o contato com a rocha subjacente, estando esta alterada ou não. A Fig. 2.1 retrata os esquemas de alguns dos principais movimentos de massa anteriormente citados.

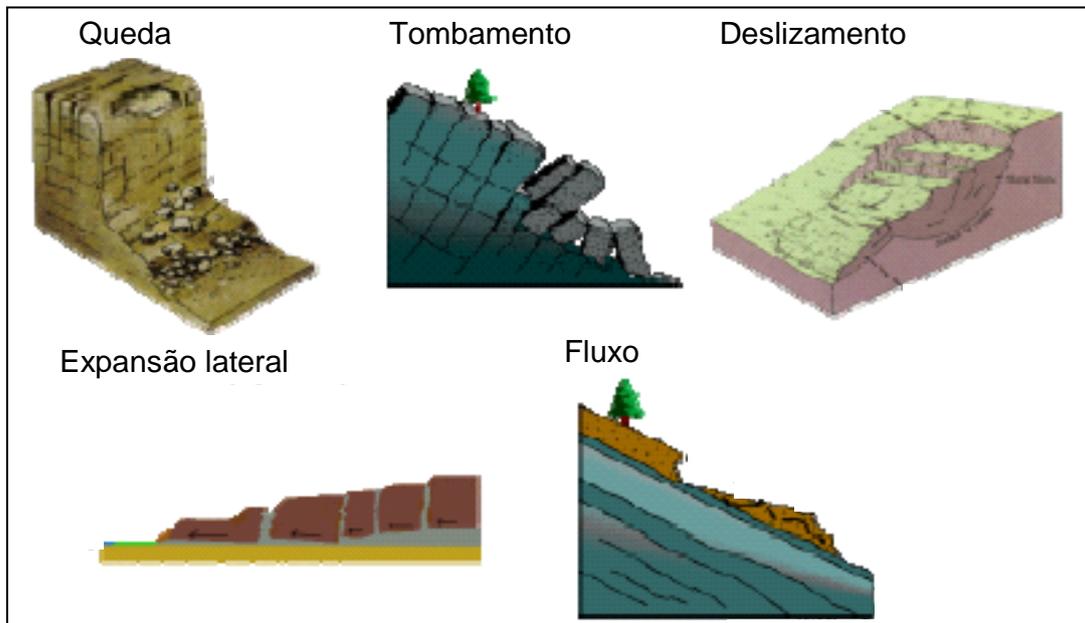


Figura 2.1 - Principais tipos de movimentos de massa (Van Westen, 2003 citado por García, 2004).

Segundo Oliveira (2004), a velocidade dos movimentos de massa pode ser considerada como uma característica extremamente importante destes eventos, sendo que tal aspecto pode ser classificado através da escala proposta que se encontra reproduzida na Fig. 2.2.

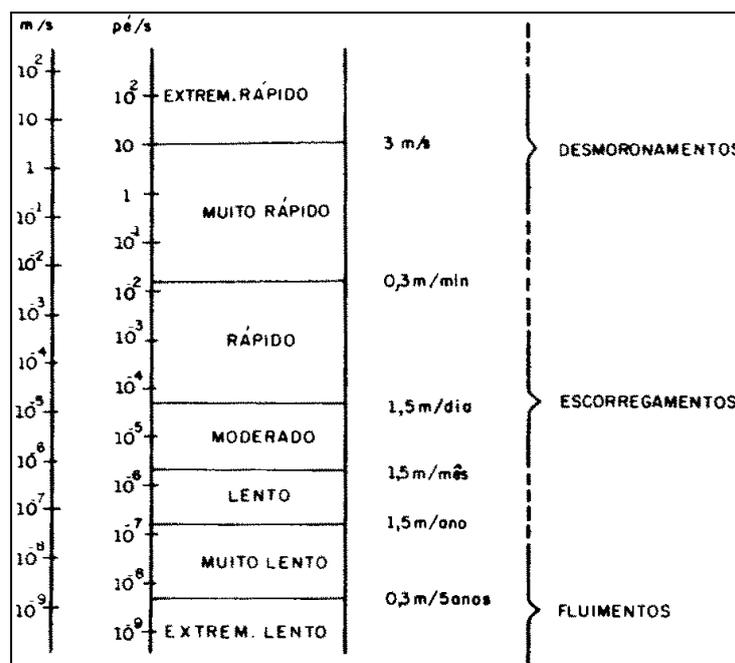


Figura 2.2 - Escala de velocidades para a caracterização dos movimentos de massa segundo Varnes (1978) citado por Oliveira (2004).

Especificamente para as encostas cariocas, Nunes et al. (1979) citados por Penha (2000b) categorizaram os deslizamentos de maneira a refletir a natureza do material e o condicionante geológico presentes nos deslizamentos. Esta classificação está fundamentada em conhecimentos de detalhes de alguns acidentes na cidade e consiste em:

- Movimentos de lascas e blocos rochosos imersos em solo residual;
- Movimentos envolvendo predominantemente solo residual com plano de ruptura sobre superfície de rocha;
- Movimentos envolvendo rocha alterada e complexos coluvionares devido a chuvas excepcionais.

Com o intuito de estabelecer os acidentes geotécnicos conforme a sua tipologia, uma classificação foi concebida pela Geo-Rio baseando-se no histórico de escorregamentos que se desenvolveram no município do Rio de Janeiro, bem como na descrição dos referidos acidentes, os quais se encontram nos laudos técnicos de vistorias confeccionados pelo corpo técnico da instituição. A classificação citada encontra-se na Tab. 2.2.

Tabela 2.2 – Classificação das diferentes tipologias dos acidentes segundo a Geo-Rio (Feijó et al., 2004).

| Tipologia dos Acidentes | | Categoria |
|--|--|-----------|
| Talude de Corte | Escorregamento de Solo (ES/tc) | 1 |
| | Escorregamento de Solo/Rocha (ES/R/tc) | 2 |
| | Escorregamento de Rocha (ER/tc) | 3 |
| Ruptura de Aterro (RA) | | 4 |
| Encosta Natural | Escorregamento de Solo (ES/en) | 5 |
| | Escorregamento de Solo/Rocha (ES/R/en) | 6 |
| | Escorregamento de Rocha (ER/en) | 7 |
| Queda/Rolamento de Blocos ou Lascas Rochosos (Q/R) | | 8 |
| Escorregamentos de Talús (ET) | | 9 |
| Ruptura de Estrutura de Contenção (REC) | | 10 |
| Escorregamentos de Lixo/Entulho (EL/E) | | 11 |
| Corrida (C) | | 12 |
| Processos Erosivos/Assoreamento (PE/A) | | 13 |

2.1.2 CAUSAS E AGENTES DETERMINANTES NA OCORRÊNCIA DOS MOVIMENTOS DE MASSA

Segundo Silva (2006), o requisito básico para o estabelecimento de decisões corretas no sentido de mitigar as consequências trazidas pelos movimentos de massa em encostas é o entendimento dos seus fatores deflagradores.

Pode-se dizer que os movimentos de massa resultam da paulatina mudança imposta por processos naturais, como o intemperismo, ou por atividades antrópicas às propriedades mecânicas dos materiais que compõe um talude (Soeteres & Westen, 1996). Por outro lado, segundo Wang & Sassa (2006), uma encosta pode ser solicitada como resultado de uma resposta quase imediata a estímulos externos, os quais podem se configurar como um único fator, tal como uma chuva intensa, um evento sísmico ou mesmo marés atmosféricas, que ocasionam, desta forma, uma redução da resistência ao cisalhamento ou um aumento dos esforços atuantes.

Afirma-se que uma cadeia de eventos, possuindo diversas vezes um caráter cíclico, originando-se com o surgimento da própria rocha juntamente com a sua história geológica e geomorfológica seguinte é que controla a ocorrência das instabilidades de encostas e taludes. Desta forma, conforme Broms (1975) citado por Silva (2006) pode-se estabelecer que condições geológicas, hidrológicas e fatores como clima e a topografia afetam a estabilidade do talude, corroborando para o início de uma movimentação. Fernandes & Amaral (1996) atentam que vários tipos de feições geológicas, como fraturas, falhas, foliações e descontinuidades, podem atuar como condicionantes da ocorrência de movimentos de massa. Estes fatores são responsáveis pela distribuição e estabelecimento dos acidentes, em se tratando do ponto de vista temporal e espacial. Além disso, em um talude, a principal força de natureza instável que exerce influência é a gravidade, a qual usualmente se desenvolve pela combinação entre o peso próprio do talude e o peso relativo de um carregamento aplicado sobre o mesmo (Krynine & Judd, 1957 citados por Silva, 2006).

Não obstante, determinar um grupo de condicionantes que atuam diretamente e de maneira imediata nesses acontecimentos é quase sempre possível (Augusto Filho & Virgili, 1998). Assim, os movimentos de massa têm sua distribuição e ocorrência atreladas a fatores que podem ser agrupados em duas categorias, podendo estas ser denominadas como variáveis condicionantes ou variáveis dinâmicas (detonantes). As variáveis dinâmicas, as quais podem ser exemplificadas pelo grau de saturação, atuam no controle dos fatores desencadeantes de uma encosta suscetível a movimentos de massa, sendo que estas variáveis são controladas

pelo clima, pela atividade humana e por processos hidrológicos que caracterizam, também, os padrões temporais dos movimentos de massa (Crosta & Frattini, 2003). Já quando se faz referência às propriedades mecânicas do solo e à topografia, que contribuem para a susceptibilidade da encosta e definem a distribuição espacial dos movimentos de massa, levam-se em conta as variáveis condicionantes.

Em se tratando da condição ambiental do Rio de Janeiro, Penha (2000b) destaca que alguns fatores, como a atuação da água de subsuperfície, a precipitação, a cobertura vegetal e a ação antrópica instituem-se de forma preponderante.

2.1.3 EVOLUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DOS MOVIMENTOS DE MASSA PROVOCADOS POR CHUVAS

Denominam-se geralmente por deslizamento de terra os movimentos de massa deflagrados por eventos chuvosos, os quais apresentam uma superfície de deslizamento planar. Chuvas intensas proporcionam o incremento rápido da pressão nos poros ou promovem a perda da componente relativa à coesão aparente, o que determina a geração de movimentos deste tipo (Terlien, 1998; Crosta, 1998; Wang & Sassa, 2003; Crosta & Frattini, 2003). A evolução transcorre de forma que o material deslocado pela rápida redução na resistência ao cisalhamento em condições não drenadas e processos de liquefação (Anderson & Sitar, 1995) se torne em um fluxo que se espalha descendentemente com o aumento do volume inicial do material deslocado pelo transporte de sedimentos retirados do canal (Wieczorek et al., 2000; Wang & Sassa, 2003). A infiltração das chuvas promove a redução da sucção, o que determina a diminuição da resistência ao cisalhamento do solo e explica para Li et al. (2005) o processo no caso dos solos não saturados. A parcela de sucção desaparece quando o solo encontra-se totalmente saturado, de forma que o lençol freático gera uma poropressão superior a zero, o que favorece o acréscimo de instabilidade do talude, uma vez que, estando positiva, esta poropressão promove a redução da resistência ao cisalhamento. Um limiar que relaciona intensidade e duração identifica as condições mínimas de chuva que provocam uma poropressão contrária à segurança em relação a uma determinada profundidade no talude (Godt et al., 2006). Para Matlan (2009), quando a duração da precipitação torna-se capaz para infiltrar no plano de escorregamento potencial considerado e, conseqüentemente, causar a redução da sucção, o mecanismo de ruptura do talude é induzido.

Assim, quanto à estabilidade de taludes, pode-se afirmar, segundo Gostelow (1991) citado por Aristizábal et al. (2010) e Iiritano et al. (1998), que o papel da precipitação pode atuar de duas formas distintas, sendo que os episódios muito intensos de chuvas proporcionam

uma redução da resistência ao cisalhamento acompanhada da diminuição da coesão e de deslocamentos na massa superficial. Por outro lado, o aumento em longo prazo da pressão nos poros em uma região de ruptura potencial pode ser estabelecido por ação de chuvas, o que proporcionaria movimentos de massa de caráter mais profundo e por meio de superfícies potenciais de ruptura já desenvolvidas. Toll et al. (2001) verificaram que a chuva antecedente tem um papel importante em relação às respostas das medidas de poropressão durante um evento chuvoso, de forma que, quando seus valores iniciais encontram-se elevados, uma forte precipitação tem a capacidade de imprimir apenas uma pequena mudança na medida da poropressão. Por outro lado, quando as medidas iniciais de poropressão encontram-se baixas, um pequeno evento chuvoso é o bastante para proporcionar uma grande mudança em seus valores.

Segundo Crosta (1998), movimentos superficiais em geral são deflagrados por chuvas curtas e intensas, sendo que, para Aleotti (2004), a distribuição e a variação por períodos prolongados das precipitações se referem àqueles movimentos de característica mais profunda.

Em se tratando das formas de ruptura determinadas pela infiltração, há a possibilidade de acontecer por dois mecanismos diferentes. O acréscimo de pressão positiva nos poros, ocasionado pela liquefação do material, apresenta-se como a primeira forma de ruptura, enquanto que a segunda forma processa-se em virtude da redução da sucção quando o material encontra-se ainda em um estado não saturado em condições de poropressões negativas, sendo que a massa se comporta como um corpo rígido (Collins & Znidarcic, 2004). O advento de poropressões positivas tende a acontecer em solos de granulação fina e com baixa infiltração, de forma que a ruptura resulta da diminuição da resistência ao cisalhamento pela perda de sucção.

Para Rahardjo et al. (2007), a magnitude na redução do fator de segurança é diretamente proporcional à grandeza e à intensidade da precipitação, de forma que estes elementos, juntamente com as propriedades do solo, configuram-se como os fatores principais que controlam a instabilidade de encostas, tendo-se que, quanto mais intenso o evento pluviométrico, mais rápido será o decréscimo do fator de segurança. Somando-se a estes fatores, Reid (1997) ressalta também pequenas alterações no controle da condutividade hidráulica do local de ocorrência dos movimentos de massa, o que traria luz à questão dos movimentos de massa apresentarem aleatoriedade na sua distribuição em taludes semelhantes aparentemente homogêneos. Ao estudar o mecanismo de ruptura relativo aos taludes compostos por solos residuais não saturados, Cho & Lee (2001) e Cho & Lee (2002)

encontraram que o campo de esforços é modificado pela distribuição de poropressão, sendo esta última controlada pela variação da condutividade hidráulica durante a infiltração da chuva. A condutividade hidráulica não apresenta uma distribuição homogênea em relação ao grau de saturação ou à sucção, embora o talude seja homogêneo texturalmente.

2.1.4 VARIÁVEIS ENVOLVIDAS NOS MOVIMENTOS DE MASSA OCORRIDOS PELA AÇÃO DA PRECIPITAÇÃO

Segundo Crosta (1998), diferentes condições de instabilidades são introduzidas como consequência da resposta a padrões de chuvas, sendo que elementos como a espessura do perfil de intemperismo, as propriedades mecânicas, físicas e hidráulicas dos solos e a cobertura vegetal contribuem para a resistência dos solos e para as condições de fluxo subsuperficial. Desta forma, a definição da probabilidade de atingir uma determinada profundidade considerada crítica em relação à saturação e, conseqüentemente, conseguir a previsão para a ocorrência de movimentos de massa deflagrados por precipitações, configuram-se como situações complexas em virtude do grande montante de variáveis envolvidas e inter-relacionadas.

Conforme Pedrosa (1994), a infiltração se caracteriza por ser um mecanismo que se destaca no processo de instabilidade de encostas provocado pelas chuvas, onde a autora ressalta que, mesmo diante de índices pluviométricos baixos, a ocorrência de movimentos catastróficos pode ser desencadeada em taludes pela infiltração em virtude das condições internas existentes no maciço, como grau de saturação, teor de umidade, índice de vazios, topografia geomorfologia e litologia. Ao estudar o efeito da infiltração causado pelas precipitações na estabilidade de taludes estratificados, Weng (2009) concluiu que a infiltração causou a redução da sucção do solo e, por conseguinte, do fator de segurança, de maneira que, tanto para o sistema estratificado, quanto para o sistema homogêneo em estudo, a condição de chuva intensa e com maior duração diminui a sucção do solo de forma mais proeminente que o cenário de precipitações com menores intensidades e de curta duração.

Dentre aqueles constituídos por solos residuais tropicais, os taludes naturais constituem-se como exemplos típicos de material não saturado no estado natural. Conforme Prandini et al. (1976) citados por Pedrosa (1994), taludes, nestas condições, apresentam alta sucção e grau de saturação que varia de 40% a 75%. Para este tipo de material, podem-se destacar trabalhos que se concentram no estudo da formação e no desenvolvimento da frente de saturação, os quais correlacionam propriedades do solo, como permeabilidade, porosidade e o grau de saturação, com a velocidade de avanço das frentes citadas.

Para solos graníticos e vulcânicos de Hong Kong, Lumb (1975) conseguiu estabelecer que os primeiros fossem menos inclinados ao desenvolvimento da frente de saturação em relação aos segundos, uma vez que nos solos vulcânicos a velocidade de infiltração é determinada pela permeabilidade das juntas. Ao realizar a correlação entre a precipitação e a espessura crítica da frente de saturação nos solos residuais e aterros de Hong Kong, o autor constatou para os solos vulcânicos o estabelecimento de espessuras típicas de até 9 m, enquanto que, para solos graníticos, encontraram-se valores de 4 m. Segundo Weng (2009), o intervalo de duração da chuva determina o avanço da frente úmida, de forma que precipitações mais longas e com baixa intensidade proporcionam uma propagação mais profunda desta frente em relação a chuvas mais intensas e de curta duração, o que levou o autor a concluir que a estabilidade de taludes é influenciada decisivamente pelo aspecto da duração das precipitações. Ao analisarem as particularidades de rupturas em taludes ocorridas no Rio de Janeiro, posteriormente a períodos de precipitação intensa e tomando como base a análise do fluxo juntamente com as relações entre a condutividade hidráulica saturada e as variações da sucção, Campos et al. (1991) citados por Pedrosa (1994) concluíram que a infiltração das águas das chuvas no interior do maciço representou o cerne das rupturas. Wolle (1988) citado por Pedrosa (1994) concluiu que as tensões de sucção são crescentes em relação à profundidade, sendo que, após um período de precipitação prévio, sua restauração é relativamente lenta, constatando ainda que, para um solo coluvial, as tensões de sucção se apresentavam com valores bem menores em relação àqueles atribuídos aos solos residuais.

Sendo a permeabilidade uma propriedade básica do solo, Wang & Shibata (2007) estabelecem que o aspecto mencionado exerce uma função de grande destaque, em se tratando do equilíbrio que deve existir entre a geração e a dissipação de poropressões, destacando que este processo apresenta-se como fundamental na inicialização do processo de movimentos de massa. Perante eventos chuvosos, Aristizábal et al. (2010) afirmam que encostas com baixo coeficiente de permeabilidade, ou seja, aquelas que possuem valores deste coeficiente inferiores ou iguais a 10^{-6} m/s, e constituídas por solos homogêneos resistem melhor a chuvas de curta duração, entendendo estas como inferiores a 24 horas, independentemente da sua intensidade, ao passo que chuvas de alta intensidade e curta duração afetam de maneira determinante a estabilidade de taludes homogêneos com valores de coeficiente de permeabilidade superiores a 10^{-5} m/s. Segundo ainda Aristizábal et al. (2010), há estudos de alguns autores que expõem a importância das precipitações de longas durações ou das chuvas antecedentes na determinação da ruptura de taludes que possuem baixa permeabilidade, pelo fato do tempo necessário para que a água proveniente da precipitação infiltre em encostas que

apresentam estas características é maior, a medida que a restauração do fator de segurança perante o evento chuvoso é muito lenta. Conforme Hengxing et al. (2003), a poropressão permanece em valores elevados, sendo que sua redução se processa de maneira lenta em perfis com baixa permeabilidade, mesmo após o término da chuva. Ainda segundo o autor, para perfis que possuem alta permeabilidade, a pressão nos poros decresce rapidamente em paralelo à diminuição da chuva.

Em se tratando da influência da vegetação na deflagração de movimentos de massa, pode-se destacar a atuação da cobertura vegetal na estabilidade de taludes por meio de duas vertentes, de forma a, em primeiro lugar, retirar umidade do solo através da evapotranspiração ou, de outra maneira, imprimindo uma componente de coesão por meio das raízes em um manto do solo (Sidle & Ochiai, 2006 citados por Aristizábal et al., 2010). Conforme Tosi (2007), as raízes podem responder à força cisalhante por meio de três distintas formas, podendo romper-se, alongar-se ou deslizar-se, sendo que tais estruturas constituem-se como um dos fatores mais importantes no que se refere à estabilidade de taludes. Gray (1970) estabelece que, em longo prazo, a remoção da vegetação irá configurar-se categoricamente como um elemento de instabilidade. Prandini et al. (1976) citados por Pedrosa (1994), ressaltam ainda que a cobertura vegetal atua retendo cerca de 20% da precipitação e o sistema radicular mais 20%, de forma que a componente efetiva de água que alcança o solo é de 60%. Deste percentual, 20% são absorvidos pelo solo não saturado proporcionando a redução da sucção, fazendo com que os 40% restantes sejam distribuídos entre o escoamento superficial e a infiltração em si. Para estudos sobre balanço hídrico de taludes em solos residuais situados em Hong Kong, Greenway (1984) citado por Pedrosa (1994) obteve um valor de 35% de intercepção, sendo que outros fatores diferentes da vegetação, como vento, a inclinação do talude e a intensidade da chuva, contribuíram para o resultado alcançado.

Em relação à cidade do Rio de Janeiro, particularmente na região do maciço da Tijuca, pode-se atribuir que o papel da cobertura vegetal atua também no sentido de limitar as áreas atingidas por escorregamentos, uma vez que o efeito frenador e dissipador de energia oferecido pela vegetação são impostos às massas deslocadas, o que permite uma restrição das regiões afetadas, diminuindo os estragos em terrenos localizados a jusante, como foi observado no evento chuvoso dos meses de fevereiro e março de 1988 (Penha, 1988 citado por Penha, 2000b). Por outro lado, para Grey & Leiser (1982), a cobertura vegetal é passível de impor certos efeitos desfavoráveis no que compete à estabilidade das encostas, sendo que estes podem corresponder a um efeito alavanca, que se trata de uma força imposta pelos troncos das árvores ao terreno quando suas copas são atingidas pelo vento, a um efeito cunha,

proporcionando uma pressão lateral causada pelas raízes ao penetrarem em fendas, fissuras e canais de solo ou rocha ou, ainda, consistirem em uma sobrecarga vertical em decorrência do peso das árvores, que pode resultar em uma ação benéfica, ou não, dependendo das características do solo em questão e da inclinação do talude.

Conforme Pedrosa (1994), devem ser levados em consideração, também, fatores naturais que imprimem ao talude modificações passíveis de serem quantificadas, uma vez que o risco de escorregamentos cresce gradualmente com a evolução natural dos taludes, decorrente do intemperismo, abertura de fissuras ou variação da cobertura vegetal. Ainda segundo a autora, tais modificações podem se apresentar como benéficas, caso atuem aumentando a estabilidade, ou, de maneira inversa, contribuindo para a instabilidade de forma a se manifestar em minutos ou em séculos.

2.1.5 EVOLUÇÃO DOS RISCOS GEOLÓGICOS ENVOLVENDO A CIDADE DO RIO DE JANEIRO

Vários escorregamentos geraram danos à população carioca em meados da década de 1960, quando chuvas intensas castigaram a cidade do Rio de Janeiro (Souza, 2004). A maioria dos problemas relacionados às encostas naquela época, uma vez que a interferência humana até então não se apresentava expressivamente, referia-se primordialmente à natureza inerente dos materiais existentes no município. O Instituto de Geotécnica, criado em 1966, nasceu neste contexto, momento no qual, portanto, a questão principal configurava-se em diminuir as fragilidades naturais do meio físico (Fundação Geo-Rio, 2005) e dedicou-se à realização de obras públicas de contenção em pontos inacessíveis das encostas nos primeiros anos de seu funcionamento (Fundação Geo-Rio, 2010).

No verão daquele ano, registraram-se centenas de acidentes geotécnicos nas encostas cariocas que resultaram em mais de 500 feridos e em um total de 70 mortes. Em fevereiro de 1967, novas chuvas torrenciais alarmaram a cidade, causando cerca de 100 vítimas fatais devido a estes tipos de acidentes e provocando, também, a destruição de casas e ruas. Neste referido mês, já haviam sido executadas 39 obras de contenção pelo Instituto de Geotécnica, sendo que, ao fim do ano de 1967, mais 50 obras haviam sido concluídas (Fundação Geo-Rio, 2010). Em virtude do crescimento desordenado e acelerado, as grandes favelas firmaram-se como o cenário dos mais proeminentes acidentes do município na década de 1980, de forma que a participação antrópica tornou-se notória e passou a exercer um papel predominante em relação ao risco geológico, devido, sobretudo, pela ocupação indiscriminada das encostas (Fundação Geo-Rio, 2005). Novamente, em decorrência da intensa pluviosidade, graves

acidentes com registro de óbitos ocorreram em fevereiro de 1988 no Morro da Formiga, no bairro da Tijuca, no Morro Santa Marta, em Botafogo e em Santa Tereza, onde um deslizamento catastrófico atingiu a Clínica Santa Genoveva.

Como consequências destes desastres, 58 vidas foram ceifadas (Fundação Geo-Rio, 2010). No fim da década de 1980, houve o desenvolvimento do projeto Geo Risco, cujo produto proporcionou a elaboração do Mapa de Susceptibilidade a escorregamentos em todo o município que contemplou diversos aspectos para cada área considerada, como condicionantes antrópicos e do meio físico (Fundação Geo-Rio, 2005). Em 1992, o Instituto de Geotécnica transformou-se em Fundação Instituto de Geotécnica do Município do Rio de Janeiro ou, simplesmente, Geo-Rio (Fundação Geo-Rio, 2010).

Mais uma vez, novos episódios de movimentos de massa foram assinalados em fevereiro de 1996, principalmente nas zonas sul e oeste da cidade, onde corridas de massa sucederam-se nos maciços da Pedra Branca e da Tijuca, devastando centenas de habitações e matando 52 pessoas (Fundação Geo-Rio, 2010). O sistema de alerta de chuvas intensas e de deslizamentos em encostas da cidade do Rio de Janeiro, denominado Alerta-Rio, cujo objetivo consiste em emitir boletins alertando a população por meio de estações de televisão e rádio sempre que existir previsão de chuvas intensas as quais são passíveis de gerar escorregamentos nas encostas, nasceu neste ano. Além disso, nos anos que se sucederam houve um desenvolvimento técnico baseado em novas técnicas de contenção, desenvolvimento e execução de metodologias para mapeamentos geológico-geotécnicos e de risco em escalas de detalhe e execução de limitações físicas de áreas de risco (Fundação Geo-Rio, 2010).

2.2 LIMITES CRÍTICOS DE CHUVA

Os limites críticos de chuva têm sido amplamente utilizados ao redor do mundo por vários investigadores para a previsão de movimentos de massa através de métodos empíricos ou estatísticos. Com o intento de abordar os principais avanços enfocados na determinação de patamares pluviométricos passíveis de desencadear deslizamentos, a presente seção retrata os diversos estudos realizados tanto na esfera mundial, quanto aqueles desenvolvidos na área específica em estudo.

2.2.1 ABORDAGENS DA CORRELAÇÃO ENTRE PRECIPITAÇÃO E DESLIZAMENTOS

Corominas (2000) afirma que várias pesquisas têm se voltado para o estudo da relação entre clima e deslizamentos pelo fato da precipitação se apresentar como o elemento que mais contribui para o desencadeamento de deslizamentos de terra em diversas regiões do mundo.

Segundo Pedrosa (1994), a quase totalidade dos trabalhos que tratam das correlações entre deslizamentos e chuvas visa encontrar um indicador demonstrativo da previsibilidade da chuva crítica, o qual, em geral, encontra-se atrelado à precipitação horária, à chuva diária ou à chuva antecedente, estando esta relacionada à quantidade de deslizamentos ou a certas características do talude, dentre as quais se podem citar a geomorfologia, a umidade do solo ou as condições de hidrologia. Ainda conforme a autora, este índice permite alertar previamente a população proveniente de áreas de risco da possibilidade de escorregamentos.

Aristizábal et al. (2010) atentam que, uma vez presentes as séries contínuas de chuva e sendo os movimentos de massa de natureza superficial, pode-se estabelecer correlações entre os episódios de movimento de massa e as características das chuvas relacionadas à sua intensidade e duração. Conforme Guzzetti et al. (2008), os limiares estatísticos podem ser reunidos em três categorias, entre as quais estão compreendidos aqueles que combinam medidas de precipitação conseguidas para acontecimentos específicos, limiares que incluem as condições antecedentes e outros limites que englobam limiares hidrológicos.

Parâmetros como a chuva total (acumulada), a chuva antecedente ao evento e a duração e a intensidade de chuva, ou mesmo uma combinação destes, se configuram como aqueles mais frequentemente investigados e de natureza mais comum (Aristizábal et al., 2010).

Conforme Soares (2006), houve a necessidade de agrupar em categorias similares os métodos que estabelecem a relação entre pluviosidade e deslizamentos em virtude da existência de uma grande variedade destes procedimentos. Desta forma, pode-se classificá-los tomando em consideração aspectos como:

- correlação da precipitação com probabilidade de deslizamentos;
- modelos matemáticos para previsão das variações de nível d'água do solo local;
- conjugação de mapas cartográficos de ocorrência de deslizamentos com mapas de isoietas;
- instalações de instrumentos de monitoração dos parâmetros do solo (inclinômetros, piezômetros) conjugados com instrumentos meteorológicos (pluviômetros);

- modelos utilizando mineração de dados para aplicação na previsão de deslizamentos ocasionados por precipitação de chuva;

Pedrosa (1994) ressalta que a aquisição de fontes idôneas de dados relacionados a chuvas, atreladas à capacidade de monitoração, à distância do local do deslizamento e da hora exata da ruptura, bem como da série histórica das informações de estudo, representa um requisito fundamental nestas correlações. Além disso, observa-se que, em áreas classificadas como críticas, uma maior colaboração para garantir que dados de chuvas sejam aproveitados por sistemas de alerta depende de uma maior estrutura instalada relativa às estações pluviométricas.

2.2.2 EXPERIÊNCIA MUNDIAL NA DEFINIÇÃO DE LIMIARES

Com base em relações empíricas e valendo-se de dados pluviométricos de diferentes lugares do mundo, Caine (1980) propôs um limiar geral que vincula a ocorrência de deslizamentos superficiais à intensidade e à duração da chuva, de forma que seu trabalho incorporou eventos que se sucederam em zonas de distintas condições geológicas e climatológicas, sendo considerado de aplicação mundial e encontra-se expresso pela Eq. 2.1.

$$I = 14,82D^{-0,39} \quad (2.1)$$

Nesta equação, I representa a intensidade da chuva em milímetros por hora e D é a duração da chuva em horas.

De caráter mais recente, a Eq. 2.2 traz um novo limite com feições mundiais que relaciona intensidade de chuva I em milímetros por hora e duração da chuva D em horas foi proposto por Guzzetti et al. (2008), o qual o é respaldado por cerca de 2.626 eventos deflagrados por chuvas:

$$I = 2,2D^{-0,44} \quad (2.2)$$

Para as regiões tropicais, a contribuição fornecida por Hong Kong apresenta-se com um caráter relevante, sendo que, conforme Pedrosa (1994), as pesquisas nesta área se avolumaram a partir dos eventos catastróficos ocorridos em 1972, os quais imprimiram grandes prejuízos e perdas humanas àquele país.

Com relação a esta região, Lumb (1975), partindo da análise dos dados relativos à frequência e distribuição das rupturas em conjunto com as informações de chuvas acumuladas a partir do dia primeiro de janeiro até a data do evento considerado, associou a pluviosidade acumulada relativa à média anual, aos dias imediatamente antecedentes e durante o evento. Obteve como resultado, face às diferentes combinações, a associação de categorias de risco referente a deslizamentos com a precipitação correspondente às 24 horas do dia do evento e a

chuva acumulada nos 15 dias antecedentes ao mesmo, de maneira que o autor elaborou uma classificação simplificada de forma a agrupar os escorregamentos em zonas de previsibilidade, sendo definidos quatro tipos de eventos, que podem ser definidos como deslizamentos isolados, menores ou secundários, severos e desastrosos.

Lumb (1975) propõe, ainda, que a análise de risco de escorregamentos seja fundamentada na combinação de alguns requisitos:

- precipitação pluviométrica nas 24 horas que antecedem o deslizamento (>100 mm);
- precipitação pluviométrica nos últimos 15 dias antecedentes ao deslizamento (>200 mm);
- definição de categorias de risco em função do número de deslizamentos e chuvas acumuladas de 15 dias – evento secundário (<200 mm), severo (>200 mm e <350 mm) e desastroso (>350 mm);
- manutenção rigorosa e constante das condições de estabilidade do maciço, preocupando-se particularmente com a ação antrópica.

Ainda com enfoque em Hong Kong, Brand et al. (1984) e Brand (1989), concentraram-se nas chuvas de longa duração, determinando, diferentemente de Lumb (1975), que as precipitações relacionadas à intensidade horária, sucedidas em 24 horas antes do evento, mostra-se como o estopim de escorregamentos, sendo passível de representar um quesito de alerta. Os autores, tomando os valores de chuvas relacionados à 1 hora e 24 horas de forma a confrontá-los com a quantidade de deslizamentos, estabelecem somente duas divisões relacionadas a risco, que são compostas exatamente por uma categoria principal na qual está presente mais de dez registros de escorregamentos em 1 dia e uma categoria secundária, onde há menos de dez escorregamentos diários. Segundo Pedrosa (1994), os autores conferem a incidência de ocorrências classificadas como principais apenas ao pico de chuva horária, desconsiderando o valor da precipitação acumulada.

Segundo Brand et al. (1984), existem fatores que controlam o relacionamento entre pluviosidade e deslizamentos:

- chuvas de curta duração e alta intensidade;
- chuvas antecedentes de poucos dias mostram-se com um papel significativo para ocorrências de deslizamentos secundários que acontecem em períodos de chuva de baixa intensidade e de curta duração;

- intensidade pluviométrica em torno de 70 mm/hora apresenta-se como um indicativo deflagrador de escorregamentos, sendo que a quantidade de eventos aumenta substancialmente para valores que ultrapassem este limite;
- as 24 horas antecedentes ao evento determinam bem a possibilidade de risco;
- a estipulação de faixas de risco para precipitações de 24 horas, sendo que, para o estudo em questão, obteve-se para o risco secundário o estabelecimento em 100mm e, para o risco principal, em 270 mm;
- registros de chuvas por instrumentação sofisticada.

Estudos posteriores (Premchitt et al., 1986; Brand, 1989) ratificam o modelo de chuvas intensas de curto prazo no entendimento da determinação de escorregamentos em Hong Kong, sendo que o aspecto que se sobressai com relação aos escorregamentos nas correlações desenvolvidas pelos autores é a intensidade de chuva horária registrada imediatamente antes da ocorrência do evento.

O trabalho proposto por Finlay et al. (1997) utilizou dados pluviométricos determinados a cada cinco minutos captados por uma vasta rede de pluviômetros existente na ilha de Hong Kong, bem como os escorregamentos registrados pelo Escritório de Engenharia Geotécnica do Governo de Hong Kong durante dez anos no intuito de, entre outros objetivos, estabelecer limiares gerais de chuvas que determinam escorregamentos isolados e prever o número de deslizamentos que irão ocorrer sob a ação de um específico evento chuvoso em uma área abrangida por estações pluviométricas.

Foi possível inferir, uma vez disponíveis registros de precipitação tomados em curtos intervalos de tempo, no decorrer de vários anos e provenientes de uma rede formada por estações próximas espacialmente, de forma conjunta com os dados de escorregamentos e das características do talude, o limite de chuva a partir do qual é passível de se esperar a ocorrência de deslizamentos, a relação entre chuvas e escorregamentos e, dado um evento chuvoso, a probabilidade média de acontecimento de um evento de deslizamento em um talude. Para a previsão dos escorregamentos, a precipitação que melhor se adaptou foi aquela relacionada ao período de três horas, sendo que a incorporação das variáveis de chuva ligadas à quinze minutos e 30 dias melhorou ligeiramente a previsão.

Os autores ressaltam que, pela existência de várias variáveis que influenciam a incidência de deslizamentos, há um alto grau de imprecisão e incerteza vinculado a estas previsões. Dentre estes fatores, estão inclusos a geologia, a drenagem, a geometria, a idade e o tipo de talude e mecanismo de deslizamento envolvido. A inclusão de alguns ou de todos os

aspectos citados mostra-se necessário para se obter uma melhora na acurácia da previsão dos limiares de chuva e da relação entre precipitação e números de deslizamentos.

As análises das informações referentes às chuvas de 1974 e 1976 realizadas para a região de Wellington City, na Nova Zelândia permitiram a Eyles et al. (1978) e Eyles (1979) definirem que a chuva acumulada em um período de quatro meses antecedentes ao evento, que situava-se entre os valores de 750 mm e 800 mm, quando relacionada ao limite de 50 mm referente à chuva de 24 horas antes do escorregamento configurava-se como o patamar detonador de vários escorregamentos.

Nielsen & Brabb (1977) citados por Pedrosa (1994), observaram, para a baía de São Francisco, que a maioria dos registros de deslizamentos catalogados nas estações chuvosas entre os anos de 1968 e 1969 e no período compreendido entre 1972 e 1973, sucederam-se durante ou imediatamente após o período de chuva atingir a faixa entre 150 mm e 200 mm, averiguando, ainda, que tempestades discretas com duração relativamente breve e estando separadas por períodos secos apresentam menos importância na determinação da ocorrência de deslizamentos que o modelo de chuva contínua de longa duração. Para a região das montanhas de Santa Cruz, na Califórnia, Wieczorek (1987) procurou estudar a implicação da intensidade e duração de informações de chuvas, cujos registros abrangiam os anos de 1975 a 1984, concluindo a influência sobre a deflagração de corridas de detritos vinculada à chuva antecedente crítica em períodos variando de 7 a 30 dias com um patamar mínimo determinado de 280 mm.

Conforme Phien-Wej et al. (1993) citados por Pedrosa (1994), a intensidade de precipitação para deflagração de deslizamentos generalizados na região situada no sul da Tailândia corresponde a 260 mm por dia.

O papel da intensidade horária e da chuva antecedente na definição de ocorrências de rupturas situadas na Coreia do Sul foi alvo do estudo de Kim et al. (1991), os quais, ao analisarem a frequência dos modelos de chuva relativos às áreas central, sudeste e área montanhosa do país, determinaram que o índice que melhor representava a distribuição de escorregamentos nestas regiões era aquele referenciado pela combinação da chuva diária na ruptura e a chuva acumulada de três dias. Os autores consideraram as mesmas categorias de risco apresentadas por Lumb (1975), propondo, a partir das informações que possuíam, limites críticos de precipitação:

- para uma intensidade de chuva horária superior a 35 mm ou para a condição de precipitação de dois dias que ultrapassasse 140 mm, isto determinaria um evento classificado como desastroso;

- um evento severo se desenvolveria para uma intensidade horária maior que 15 mm ou para chuva acumulada de dois dias superior a 80 mm;
- caso os limites de intensidade horária se encontrassem acima de 10 mm ou a precipitação acumulada de dois dias fosse superior a 40 mm permitiria o desencadeamento de um evento secundário.

Precipitações associadas a eventos históricos em Seattle permitiram que Chleborad (2000) citado por Aristizábal (2008) identificasse limiares de chuvas ligados a movimentos de massa que utilizam a precipitação antecedente dos três dias anteriores ao movimento contra a quantidade de chuva dos quinze dias anteriores aos três dias considerados, de forma que, para a fixação destes limites foram usados somente os períodos em que constasse três ou mais registros de movimentos de massa.

Larsen & Simon (1993), baseando-se na metodologia de Caine (1980), desenvolveram uma relação entre a intensidade e a duração das precipitações em episódios que culminaram em deslizamentos na região de Porto Rico valendo-se, para tanto, de dados de chuvas ocorridas no período entre 1959 e 1991, e chegando, a partir disto, no estabelecimento de um limiar crítico representado pela Eq. 2.3:

$$I = 91,46D^{-0,82} \quad (2.3)$$

A variável I relaciona-se a intensidade de chuva em milímetros por hora e D representa a duração de chuva em horas.

Incorporando as informações referentes aos anos de 1993 e 2003, àquelas já existentes e com a mesma abordagem adotada por Larsen & Simon (1993), Pando et al. (2004) atualizaram o limite crítico de chuva pela recopilação de dados relativos a 75 tormentas que provocaram deslizamentos em Porto Rico, propondo uma nova relação empírica mostrada na Eq. 2.4 que repousa também nos critérios de intensidade e duração de chuva:

$$I = 53,37D^{-0,78} \quad (2.4)$$

Novamente, a incógnita I é a intensidade de chuva em milímetros por hora e D corresponde à duração de chuva em horas. A Fig. 2.3 apresenta o limiar já mencionado anteriormente proposto por Caine (1980), baseado em 73 pontos de várias localidades ao redor do mundo juntamente com os limiares desenvolvidos por Larsen & Simon (1993) e por Pando et al. (2004), que foram percorridos acima e que referem-se à região de Porto Rico.

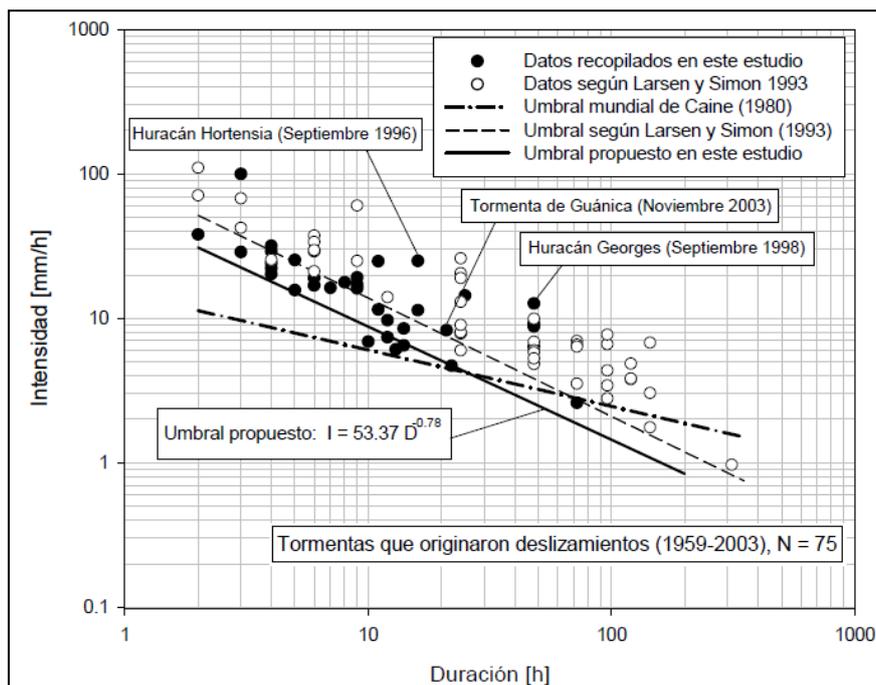


Figura 2.3 - Limiões pluviométricos propostos em nível mundial e para Porto Rico (Pando et al., 2004).

Com relação aos estudos desenvolvidos para a América do Sul, pode-se destacar aquele realizado por Moreno et al. (2006) em Antioquia, Colômbia, que estabeleceu um limite de chuva propício à materialização dos escorregamentos, baseado na precipitação antecedente de 3 dias ao acontecimento e naquela de quinze dias precedente a esta última, estabelecendo também a definição de regiões para a ocorrência de deslizamentos mediante o valor da chuva antecedente.

Por meio da compilação de uma base de dados relacionados a movimentos de massa detonados por chuvas que se processaram no vale de Aburrá, região pertencente ao departamento de Antioquia, Zapata (2010) procurou estabelecer um método de cunho empírico capaz de averiguar a importância da chuva antecedente como estopim destes tipos de acidentes. Para tanto, foram avaliadas a influência da chuva acumulada de 1, 3, 5 e 7 dias, e a chuva acumulada antecedente a esta de 5, 10, 15, 25, 30, 60 e 90 dias. Como resultado, o autor infere que, em decorrência das características dos eventos chuvosos que se verificam no vale de Aburrá, as chuvas prolongadas ou a precipitação acumulada de vários dias têm uma importância significativa na determinação dos movimentos de massa desenvolvidos neste território. Assim, deduz-se que exista uma maior resistência à ação de chuvas intensas e/ou curtas.

As análises realizadas a partir das diversas combinações citadas de precipitação acumulada e chuva acumulada antecedente forneceram como proposta para a definição de

limiares críticos a combinação determinada pela chuva acumulada de cinco dias e pela chuva acumulada antecedente a esta, de 60 dias. Pode-se estabelecer que a maioria estudada do número de deslizamentos deflagrados por chuva permanece abrangida pela condição de chuva antecedente de cinco dias, compreendida entre 0 mm e 100 mm, e de chuva acumulada antecedente a esta, de 60 dias, variando entre 160 mm e 540 mm, de forma que, uma vez alcançados ou superados os limites superiores dos intervalos acima estabelecidos, a área inteira que compreende o vale de Aburrá oferece possibilidades elevadas de desenvolvimento de movimentos de massa determinados por precipitações.

2.2.3 ESTUDOS NACIONAIS SOBRE LIMIARES PLUVIOMÉTRICOS

Mediante a seleção e o exame de 101 registros de chuvas intensas colhidos em regiões pertencentes a São Paulo, Ceará, Rio de Janeiro e ao sul de Minas Gerais, Guidicini & Iwasa (1976) efetuaram estudos estatísticos de correlações entre informações de escorregamentos e dados pluviométricos no sentido de observar a influência das chuvas antecedentes relativas a 3, 7, 15, 30, 60, 90 e 120 dias na determinação da ocorrência de deslizamentos.

Por meio da análise dos referidos dados procedentes das diversas áreas, os autores inseriram coeficientes de risco relacionados aos registros pluviométricos. O coeficiente de ciclo ou histórico da pluviosidade, composto pela razão entre a pluviosidade acumulada até a data do evento e a média anual de chuva, permite ponderar a importância da chuva antecedente. A relação entre a chuva registrada no episódio e a média anual da pluviosidade denomina-se coeficiente do episódio, sendo que a soma representada por este termo e o coeficiente de ciclo acima descrito configura o chamado coeficiente final.

Como resultado, foi possível agrupar os casos abordados em quatro faixas de concentração de episódios denominadas A, B, C e D, que correspondem respectivamente às probabilidades de 100%, 85%, 33% e 0% de ocorrência de deslizamentos. Similarmente, foram adotadas quatro zonas para relacionar as variações do coeficiente de ciclo chamadas novamente de faixas A, B, C e D, relacionadas às porcentagens 100%, 67%, 31% e 0%, respectivamente. Estes resultados se expõem sob a forma de gráficos, também denominados de “Cartas de Periculosidade”, os quais foram desenvolvidos para cada área estudada de forma a associar as zonas de risco anteriormente definidas com a curva acumulada de pluviometria relativa à média anual, sendo que aquela relativa para a região do Rio de Janeiro encontra-se exemplificada na Fig. 2.4.

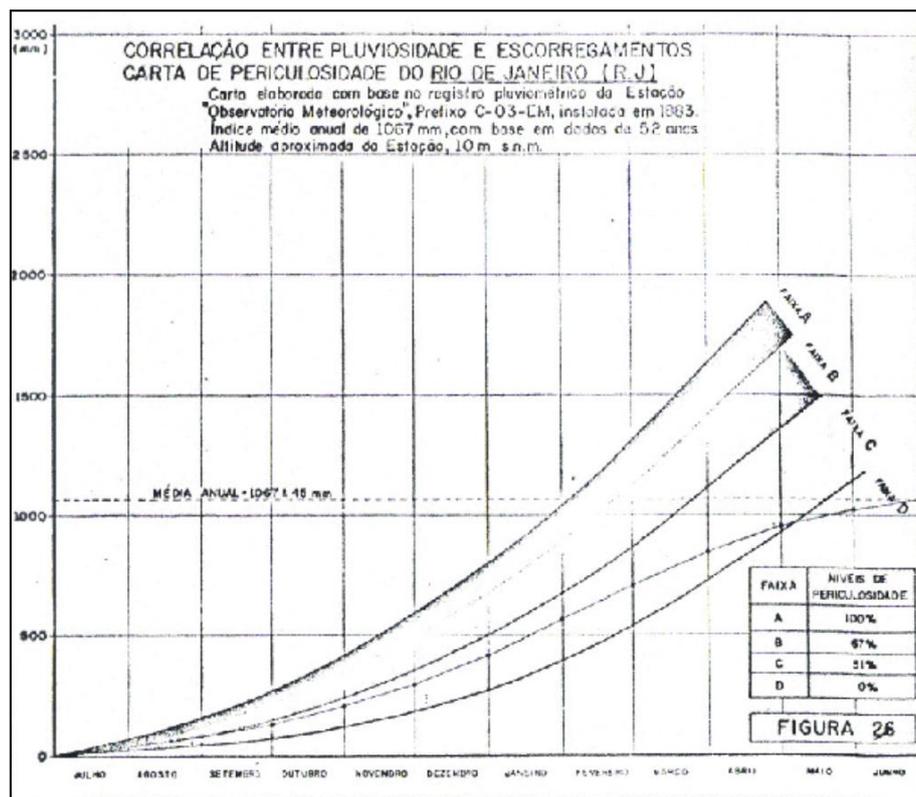


Figura 2.4 – Carta de periculosidade do Rio de Janeiro (RJ) (Guidicini & Iwasa, 1976).

Observou-se que à medida que se aproxima temporalmente da data do evento de chuvas intensas, o gradiente de pluviosidade expressa uma inclinação ao aumento, tendendo, contudo, a estabilização para intervalos de tempo que ultrapassam 30 dias se referindo a partir da data do acontecimento do episódio. A pluviosidade elevada antecedente a um episódio de chuva é relevante para os autores, uma vez que tal condição promove, mesmo para intensidades horárias baixas, um potencial risco ao evento de escorregamento.

Dentre as conclusões obtidas pelos autores ao cruzarem os acidentes de deslizamentos e as chuvas para as áreas de estudo, ressalta-se aquelas afirmando que o fator deflagrador de escorregamentos está intimamente ligado com índices de pluviosidade que ultrapassam 12% da pluviosidade média anual em períodos de 24 a 72 horas, de forma que o risco encontra-se bem demarcado pelos dados de chuvas referentes exatamente a este intervalo situado entre as 24 e 72 horas antecedentes ao episódio. Destaca-se, também, que os registros pluviométricos que não possuem capacidade de determinar a ocorrência de deslizamentos são aqueles inferiores a 8% no referido intervalo de tempo e que, quando os índices pluviométricos compreendidos no intervalo de 24 a 72 horas permanecem na faixa entre 8% e 12% da pluviosidade média anual, o desencadeamento de deslizamento só se processaria caso o registro pluviométrico tivesse atuado no sentido de promover a sustentação de um elevado grau de saturação e concentração de umidade no meio do período anterior ao evento.

Costa Nunes (1982) citado por Pedrosa (1994) sugeriu, apoiado em dados de escorregamentos que se desenvolveram em circunstâncias de intensa pluviosidade para estudos de recuperação de rodovias, um patamar de 40 mm/h como determinante para a ocorrência de eventos de deslizamentos, sendo que o fechamento de estradas seria cabível a partir do instante que este limite fosse suplantado. De outra forma, Vargas et al. (1986) estipula que este limite seria de 50 mm/h, embasado, para tanto, em pesquisas de estabilidade de taludes em solos residuais que se encontram sujeitos ao processo de infiltração das águas de chuva e pelo mecanismo de avanço da frente de saturação resultante.

A metodologia aplicada por Tatizana et al. (1987 a,b) consistiu na análise de chuva horária e deslizamentos para a região da Serra do Mar, especificamente nas proximidades do município de Cubatão, concluindo que intensidades fortes de chuvas associadas a uma alta precipitação acumulada em quatro dias têm um papel peremptório na determinação de eventos de escorregamentos, proporcionando a desestabilização do solo por meio da modificação da resistência ao cisalhamento e do aumento das forças solicitantes.

O estudo determinou que a susceptibilidade de escorregamentos seria dependente de um conjunto de fatores, como a geologia, geomorfologia, declividade, cobertura vegetal, regime pluviométrico e o posicionamento da encosta, bem como do desenvolvimento de fenômenos atrelados a ação das chuvas, como subpressão, linhas de fluxo e erosão, tornando-se, no entanto, bastante laborioso examinar cada um destes elementos individualmente.

Os registros pluviométricos foram plotados em gráficos de acumuladas e intensidade horária ao longo do tempo, sendo descartados os valores inferiores a 10 mm/h. Tais representações foram definidas pelos autores como envoltórias de deslizamentos, de forma que, uma vez estando os dados lançados nestes gráficos, foi possível definir de maneira manual uma curva delimitadora entre os dados que apresentaram ocorrências de deslizamentos daqueles em que não houve acidentes. O modelo matemático que engloba esta condição pode ser representado pela Eq. 2.5.

$$I(AC) = K \times (AC4d)^{-0,933} \quad (2.5)$$

Onde:

$I(AC)$ = intensidade horária;

$AC4d$ = quantidade de chuva acumulada referente aos 4 dias anteriores ao evento;

K = parâmetro condicionado às condições geotécnicas da encosta, a intensidade dos escorregamentos e ao modelo de ruptura.

A classificação dos deslizamentos foi realizada mediante a distribuição dos distintos registros em categorias que refletiam seu modelo de ruptura. Desta forma, os autores

conceberam a existência de quatro classes, sendo estas categorias denominadas de escorregamentos induzidos, escorregamentos esparsos, escorregamentos generalizados e escorregamentos do tipo corrida de massa. A referida classificação dos deslizamentos encontra-se na Tab. 2.3, sendo que cada categoria está associada a um respectivo valor do parâmetro K.

Tabela 2.3 – Classificação dos escorregamentos segundo Tatizana et al. (1987a,b).

| Envoltória de escorregamentos | Parâmetro K |
|--------------------------------------|-------------|
| Escorregamentos induzidos | 2,603 |
| Escorregamentos esparsos | 3,579 |
| Escorregamentos generalizados | 5,466 |
| Escorregamentos tipo corrida de lama | 10,646 |

A Fig. 2.5 representa o exemplo da envoltória de escorregamentos para aquelas ocorrências do tipo induzidas.

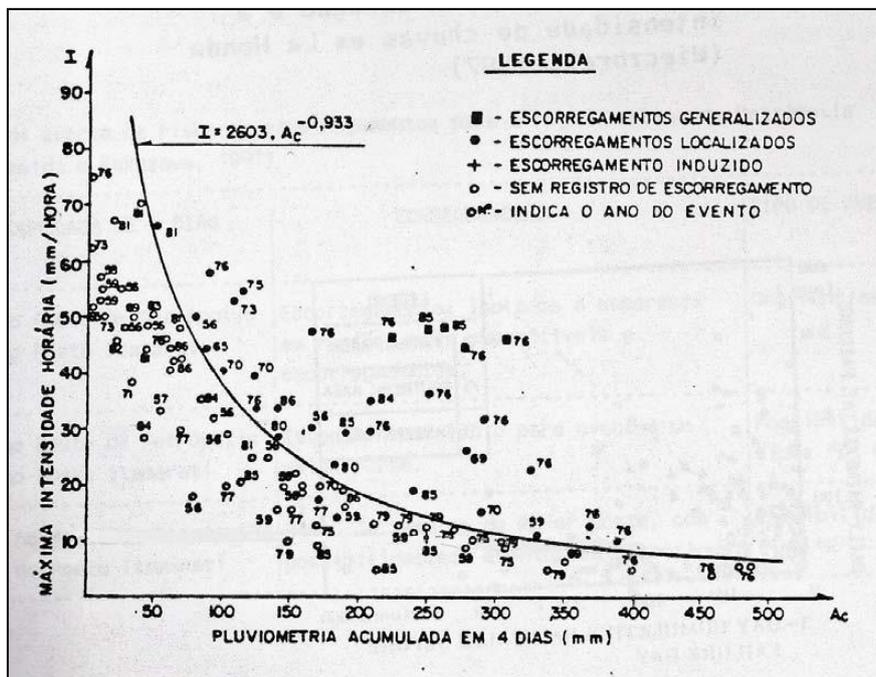


Figura 2.5 – Envoltória de escorregamentos induzidos com relativos ao posto pluviométrico Curva da Onça (Tatizana et al.,1987a).

Segundo Soares (2006), um índice adimensional denominado coeficiente de precipitação crítica (CPC), que mensura a susceptibilidade de escorregamentos com o desenvolvimento das chuvas e possui uma função na prevenção de escorregamentos, também é proposto por Tatizana et al. (1987 a,b) expressando-se pela Eq. 2.6.

$$CPC = \frac{I_i}{I_{ci}} \quad (2.6)$$

Onde:

I_i = intensidade horária em mm/h, medida na hora i ;

I_{ci} = intensidade horária crítica para a ocorrência de deslizamentos induzidos, obtida a partir da respectiva envoltória de escorregamentos induzidos;

Pela restrição dos dados disponíveis em relação aos eventos classificados como esparsos, generalizados e corridas de lama, as envoltórias de escorregamentos para estes tipos de ocorrências apenas acompanharam a configuração daquelas envoltórias relacionadas aos escorregamentos induzidos, o que não proporciona uma confiabilidade adequada.

Para o município de Petrópolis, um estudo probabilístico relacionado ao risco de ocorrência de escorregamentos foi concebido por Almeida & Nawazawa (1991) citado por Pedrosa (1994), fundamentado em índices pluviométricos e em dados relativos a 1.131 casos de deslizamentos, estando estes últimos relacionados ao período compreendido de 1938 a 1989, estabelecendo, a partir disto, uma classificação dos referidos eventos associados aos escorregamentos em cinco categorias, as quais se encontram discriminadas na Tab. 2.4, mediante o critério da quantidade de ocorrências.

Tabela 2.4 – Classificação dos eventos de escorregamentos por ocorrência (Almeida & Nawazawa, 1991 citado por Pedrosa, 1994).

| Tipo de evento de escorregamento | Número de ocorrências de escorregamentos |
|----------------------------------|--|
| A | 1 |
| B | 2 a 5 |
| C | 6 a 15 |
| D | 16 a 30 |
| E | Acima de 30 |

As análises procedidas levaram à determinação de que a chuva acumulada de quatro dias com uma precipitação que suplantasse 30 mm estabelecerá de forma mais satisfatória a probabilidade de risco de escorregamento. Como conclusão, os autores conseguiram desenvolver um critério de risco de escorregamentos composto por três classes que representam níveis crescentes de alerta, mediante a informação de precipitação proveniente de dois postos pluviométricos localizados em Itamarati e Petrópolis, estabelecendo como 40 mm o delimitador de precipitação a partir do qual sua extrapolação promove possivelmente o

desencadeamento de deslizamentos. A Tab. 2.5 estabelece as categorias deste critério com os respectivos valores de chuva acumulada, consequências e os tipos de eventos segundo a classificação de Almeida & Nawazawa (1991) citado por Pedrosa (1994).

Tabela 2.5 – Critérios de alerta de risco de escorregamentos para área urbana de Petrópolis (Almeida & Nawazawa, 1991 citado por Pedrosa, 1994).

| Critério | Chuva acumulada de 4 dias | Consequências | Tipo de evento de escorregamentos |
|----------|--|---|---|
| Estado 1 | <p>≥ 40 mm no Posto de Petrópolis</p> <p>≥ 30 mm no Posto de Itamarati</p> | Escorregamentos isolados a esparsos em regiões mais suscetíveis a escorregamentos | Ocorrências dos tipos A e B |
| Estado 2 | <p>≥ 90 mm no Posto de Petrópolis</p> <p>≥ 60 mm no Posto de Itamarati</p> | Estado preparatório para eventos de maior porte | Possibilidade de ocorrência dos tipos C e D |
| Estado 3 | <p>≥ 150 mm no Posto de Petrópolis</p> <p>≥ 130 mm no Posto de Itamarati</p> | Risco de eventos de maior porte, com a possibilidade de eventos catastróficos | Possibilidade de ocorrência do tipo E |

Cerri (1993) desenvolveu um trabalho abrangendo as regiões de Cubatão, Baixada Santista e Litoral Norte Paulista, relacionado ao gerenciamento de riscos geotécnicos, o qual consiste nas seguintes fases:

- Identificação dos riscos por meio da determinação dos locais que apresentam maior susceptibilidade a desenvolverem escorregamentos planares, levando em conta suas possíveis implicações;
- Análise de risco, sendo fracionada em determinados graus, os quais são compostos pelo risco iminente (situação de instabilidade avançada, não sendo passível de acompanhamento em relação a seu desenvolvimento, com possibilidade de ruptura para baixos índices de precipitação), alto risco e baixo risco (presença de provas da movimentação do talude com a capacidade de verificação da sua evolução em relação

à instabilidade, podendo ou não sucumbir à ruptura para situações de chuvas intensas e/ou de longa duração, sendo que a distinção entre baixo e alto risco é relacionada pelo sítio da instabilidade dentro do talude, como o topo ou a base e pelo padrão da moradia) e sem risco (não há indícios de movimentação do talude, nem são identificadas possíveis consequências);

- Medidas de prevenção de acidentes visando abolir e/ou minimizar riscos, impedir o processo de instabilidade de novas áreas de risco e conviver com aqueles já existentes atualmente, sendo que, atrelado a esta última ação, há a inserção, por parte do autor, de uma sugestão referente a um plano de prevenção de acidentes para a região em estudo que consiste na correspondência entre chuvas e escorregamentos induzidos, relacionados ao modelo planar e que são comuns nesta área;
- Planejamento em situações de emergência com a instituição de diretrizes pelos órgãos públicos competentes por assistir a população vitimada pelos eventos;
- Informações públicas e treinamento, de caráter técnico, capazes de serem difundidas por meio de canais acessíveis e sob a forma de conotações preventivas aos órgãos públicos e à população, principalmente para áreas consideradas de risco.

A proposta que relaciona chuvas e deslizamentos, atribuída à Cerri (1993), configura-se como um elemento pertencente ao seu estudo descrito acima, sendo fundamentada nas propostas de Guidicini & Iwasa (1976) e Tatizana et al. (1987 a,b), já expostas anteriormente. Apoiando-se em Tatizana et al. (1987 a,b), o autor determinou valores para o coeficiente de precipitação crítica (CPC) relacionados a quatro classes de deslizamentos, utilizando, no entanto, um valor de chuva acumulada de 84 horas na envoltória de escorregamentos para a definição da intensidade horária crítica, de forma distinta daquela estabelecida por Tatizana et al. (1987 a,b), que incorporou aquele referente a quatro dias. A Tab. 2.6 mostra os valores para o coeficiente de precipitação crítica determinados por Cerri (1993).

Tabela 2.6 - Valores propostos para CPC relacionados a deslizamentos segundo Cerri (1993).

| Tipo de deslizamento | Valor CPC |
|---------------------------------------|-----------|
| Deslizamentos induzidos | 1 |
| Deslizamentos esparsos | 1,4 |
| Deslizamentos generalizados | 2,1 |
| Deslizamentos do tipo corrida de lama | 4,1 |

Em se tratando do plano de prevenção de acidentes, Cerri (1993) ainda estabelece o acompanhamento de dois valores relacionados ao coeficiente de precipitação crítica, sendo estes denominados coeficiente de precipitação crítica efetivo (CPCef) e coeficiente de precipitação crítica potencial (CPCpot). O primeiro iguala-se ao já citado CPC, modificado por Cerri (1993), enquanto o segundo está ligado ao ingresso de um fator denominado de intensidade horária potencial (Ipi), que incorpora a previsão meteorológica para a precipitação. A classificação das diferentes intensidades de chuva com as suas respectivas intensidades horárias potenciais é mostrada na Tab. 2.7.

Tabela 2.7 – Valores de intensidade horária potencial segundo Cerri (1993).

| Classificação | Valores de Ipi (mm/h) |
|---------------------|-----------------------------|
| Leve a fraca | 9 |
| Fraca a moderada | 17 |
| Moderada | 26 |
| Moderada a forte | 32 |
| Forte | $(59,1 - 0,09ACi) \geq 32$ |
| Forte a muito forte | $(72,31 - 0,12ACi) \geq 32$ |

Fundamentando-se no coeficiente de ciclo presente no trabalho de Guidicini & Iwasa (1976), Cerri (1993) desenvolveu o chamado coeficiente de ciclo móvel (CCM), o qual corresponde à razão entre a precipitação acumulada referente ao período de 01 de junho até a data do episódio e o acumulado normal de chuva neste mesmo período.

O autor preparou os Planos Preventivos da Defesa Civil, pautando-se nos coeficientes por ele proposto, o que conduziu a inserção de bases normativas técnicas de entrada e saída, estabelecendo os níveis denominados observação, atenção, alerta e alerta máximo para as regiões estudadas.

O estudo desenvolvido por Pedrosa (1994) visou estabelecer a influência da precipitação acumulada e da intensidade horária na ocorrência de deslizamentos pela utilização de dados das cidades de Hong Kong e do Rio de Janeiro, sob o enfoque de propostas tradicionais destas regiões, trazendo também diretrizes e sugestões para a elaboração e implantação do, até então não concebido, sistema de alerta contra deslizamentos na cidade do Rio de Janeiro. Pela aplicação da proposta de Guidicini & Iwasa (1976) nos registros provenientes do Rio de Janeiro, a autora pôde concluir que se deve levar em consideração o crescimento do gradiente de pluviosidade nos dias antecedentes a um evento

de chuva intensa, observando ainda que a previsão das circunstâncias de eventos relacionadas a escorregamentos torna-se mais precisa quando incorpora ao índice de pluviosidade crítico de quatro dias antecedentes o valor de precipitação prevista para um intervalo máximo de 24 horas provenientes de informações meteorológicas confiáveis.

Souza (2004), em sua tese de doutorado, valendo-se de registros de escorregamentos entre os anos de 1998 e 2001 procedentes do município do Rio de Janeiro, juntamente com parâmetros meteorológicos e do solo, empenhou-se em criar uma metodologia de mineração de dados com o enfoque de estudar a ocorrência de escorregamentos ocasionados por episódios de chuvas intensas, utilizando Sistemas de Informações Geográficas. A etapa da metodologia referente à preparação de dados consistiu no preenchimento das informações das variáveis de chuvas e volume de escorregamentos ausentes, sendo que as primeiras foram feitas por intermédio de técnicas estatísticas, atividades de agrupamento de dados e redes neurais artificiais, e as últimas pela aplicação do algoritmo KNN, o qual consiste na substituição dos valores ausentes por aquele relativo ao objeto completo mais similar pertencente ao conjunto de dados.

O passo posterior à preparação de dados apresentou-se como a confecção de modelos preditivos de escorregamentos e chuvas intensas. Os resultados alcançados pela utilização de técnicas de redes neurais artificiais e modelos formados com regras de associação mostraram-se satisfatórios em se tratando dos escorregamentos, sendo que, comparativamente, a segunda técnica apresentou um nível de detalhamento na predição superior que a primeira. Já para a previsão de chuvas intensas, se destacou o uso das redes neurais artificiais.

Soares (2006), utilizando a proposta conferida a Tatizana et al. (1987a,b), com as devidas adaptações à área de Angra dos Reis e utilizando os dados de chuva e escorregamentos representativos ao período de 1993 a 2002, procurou obter parâmetros úteis para a previsão de deslizamentos provocados pela precipitação acumulada, de forma que o método modificado utilizado na pesquisa se configurasse como uma ferramenta de fácil aplicação. A autora utilizou duas abordagens no intuito de relacionar precipitação e escorregamentos, sendo que a primeira consistiu no uso de gráficos de distribuição temporal de chuvas com e sem a presença de dados de escorregamentos. O resultado desta análise mostrou que a definição clara das precipitações que promovem a deflagração destes eventos nem sempre se mostra presumível.

A segunda análise refere-se à confecção dos gráficos de envoltórias, relacionando a chuva acumulada de 24 horas com a chuva acumulada nos dias anteriores, de forma que esta se configurou como uma relação mais consistente entre as informações de precipitação e

escorregamentos. Embora a pluviosidade acumulada de um a cinco dias caracterizasse mais significativamente o relacionamento entre os aspectos estudados, a distinção dos registros de chuva que apresentam vinculação a dados de deslizamentos daqueles que não os possuem é melhor representada pelo gráfico que leva em consideração a precipitação acumulada de dois dias, o qual se encontra reproduzido sob a forma de envoltória de escorregamentos na Fig. 2.6.

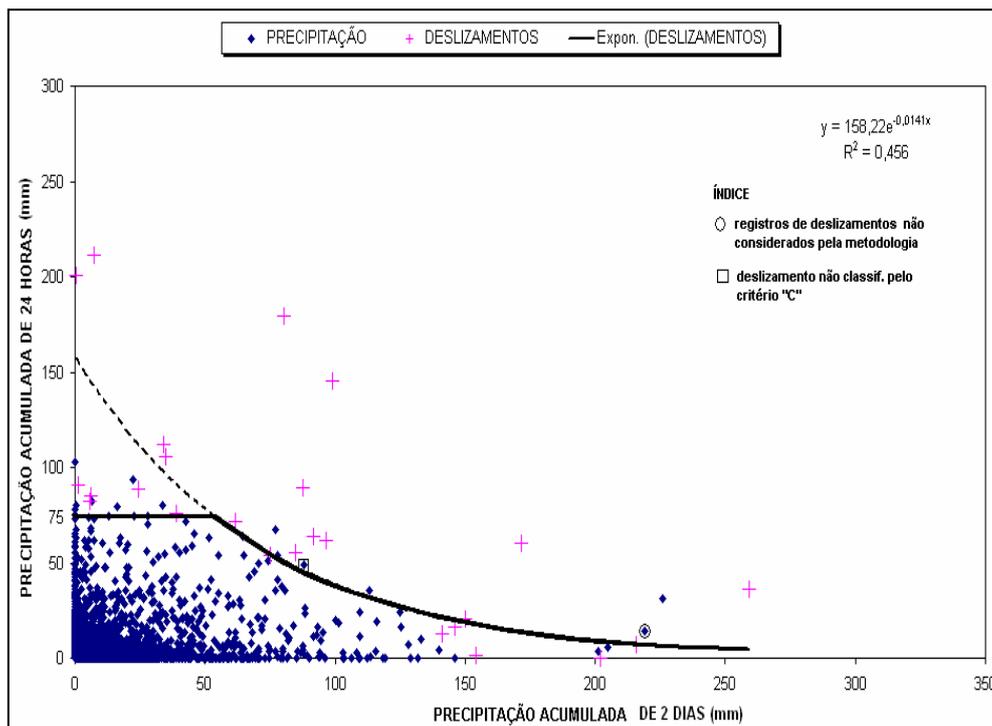


Figura 2.6 - Envoltória para precipitação acumulada de 2 dias antecedentes com a precipitação acumulada de 24 horas (Soares, 2006).

A autora ressalta que estes resultados, uma vez que se encontram alocados em uma escala de tempo passível de ser antecipada por meio dos modelos operacionais pertencentes aos núcleos regionais relacionados à previsão do tempo, são pertinentes e podem ser incorporados à previsão de chuvas, obtendo-se, conseqüentemente, um indicativo da determinação de escorregamentos.

Ao estudar a incidência e a susceptibilidade de movimentos de massa do tipo rasos ocorridos no Distrito de Cascatinha pertencente ao município de Petrópolis, estado do Rio de Janeiro, Reimer (2006) constatou que o maior número de eventos de deslizamentos coincidiu com os meses que apresentaram maior registro pluviométrico.

Baseando-se em 65 eventos de deslizamentos e dados pluviométricos referentes a apenas cinco estações pluviométricas, D'Orsi et al. (1997) citado por Ortigao et al. (2001) desenvolveu um amplo estudo que correlacionava chuvas e escorregamentos para o Rio de

Janeiro, de forma que este trabalho resultou em um critério preliminar para o nível de escorregamentos adotado pela Fundação Geo-Rio.

Conforme d'Orsi et al. (2002), a Gerência de Programas Especiais (GPE), pertencente à Diretoria de Estudos e Projetos da Fundação Geo-Rio, buscou definir critérios para a classificação de um evento pluviométrico que apresentaria um caráter significativo para fins de estudo. Com base neste objetivo e observando que os critérios relacionados a chuvas acumuladas de 96 horas adotados em 1998 não se apresentavam de maneira satisfatória no sentido de se adequar aos eventos de deslizamentos desenvolvidos em situações de precipitação intensa, novas diretrizes foram estabelecidas, pautadas em termos de chuvas horárias e diárias, já que, de maneira histórica, os acidentes mais relevantes no município do Rio de Janeiro tendem a estar atrelados à precipitação intensa de curta ou média duração. Estes critérios passaram a vigorar a partir de 1999, sendo que a determinação do início do evento pluviométrico é declarada por meio das seguintes regras:

- Pelo menos uma estação com precipitação maior ou igual a 75% do índice crítico: 37,5 mm/h ou 131 mm/24h;
- Pelo menos duas estações com precipitação maior ou igual a 60% do índice crítico: 30 mm/h ou 105 mm/24h;
- Pelo menos três estações com precipitação maior ou igual a 50% do índice crítico: 25 mm/h ou 87,5 mm/24h;
- Pelo menos dez estações com precipitação maior ou igual a 30% do índice crítico: 1 mm/h ou 52,5 mm/24h;
- Pelo menos 20 estações com precipitação maior ou igual a 10% do índice crítico: 5 mm/h;

O final de um evento de precipitação é caracterizado pelo critério de que todas as estações apresentem precipitação abaixo de 2,5 mm/h ou 8,8 mm/24h, o que representa 5% do índice crítico. Institui-se, ainda, que o intervalo mínimo entre estes episódios seja de período de 12 horas com todas as estações atendendo o exposto para o final de um evento.

O trabalho de Tatizana et al. (1987a) norteou as correlações desenvolvidas entre chuvas e acidentes geotécnicos pela Fundação Geo-Rio em seus relatórios de escorregamentos elaborados anualmente, sendo que a instituição, ao incorporar características do sistema Alerta Rio, bem como os aspectos climáticos da região e o histórico de deslizamentos ocorridos no município, modificou a metodologia proposta pelo autor de forma a considerar a última hora de precipitação nas 96 horas anteriores ao evento de escorregamento.

Buscou-se, então, relacionar os eventos pluviométricos com os respectivos acidentes geotécnicos ocorridos perante cada episódio de chuva classificado, resultando na categorização destes eventos mediante a quantidade de escorregamentos que se encontra explicitada na Tab. 2.8.

Tabela 2.8 – Definição de classes para eventos pluviométricos (d’Orsi et al., 2002).

| Categoria de Evento Pluviométrico | Número de Acidentes Geotécnicos |
|-----------------------------------|---------------------------------|
| Fraco | Até 25 |
| Moderado | 25 a 125 |
| Forte | 125 a 250 |
| Catastrófico | Maior que 250 |

Os gráficos confrontando o acumulado de chuva de 96 horas pelo acumulado de chuva horário e acumulado de chuva diário com a distribuição dos diversos eventos pluviométricos ocorridos no ano de 1999, segundo a abordagem, encontram-se representados nas Fig. 2.7 e Fig. 2.8, respectivamente. Nas referidas figuras ainda encontram-se demonstradas as curvas das envoltórias que representam a relação entre intensidades de chuva e deflagração de acidentes nas encostas do município do Rio de Janeiro, para ambos os acumulados pluviométricos.

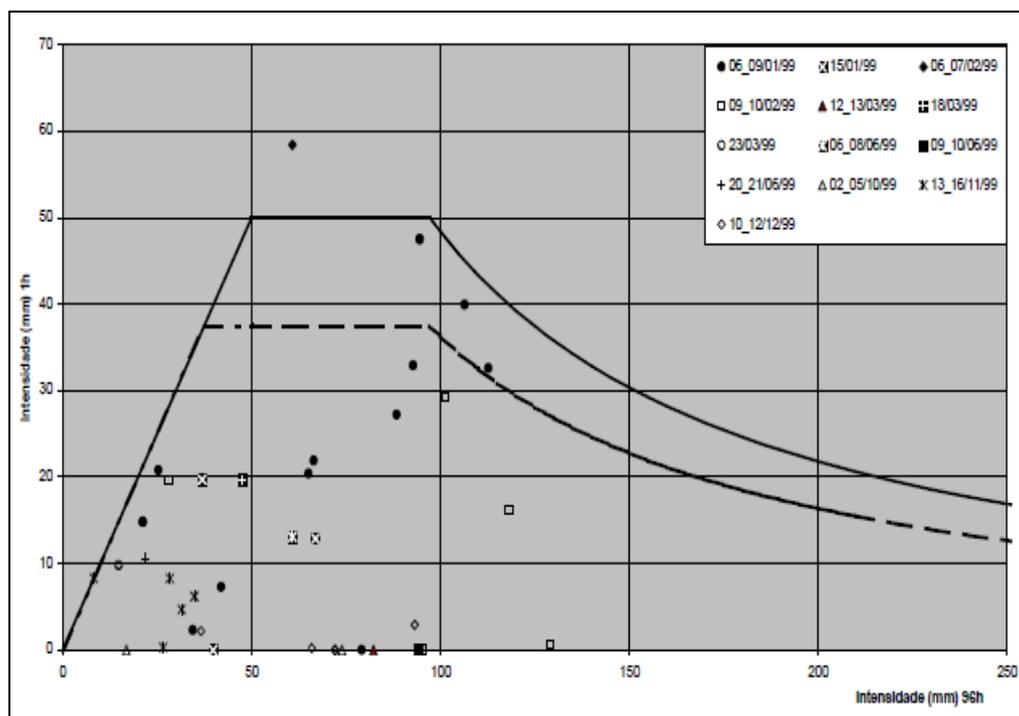


Figura 2.7 - Gráfico de chuva horária pela chuva acumulada de 96 horas com a representação dos eventos de precipitação para o ano de 1999 (d’Orsi et al., 2000).

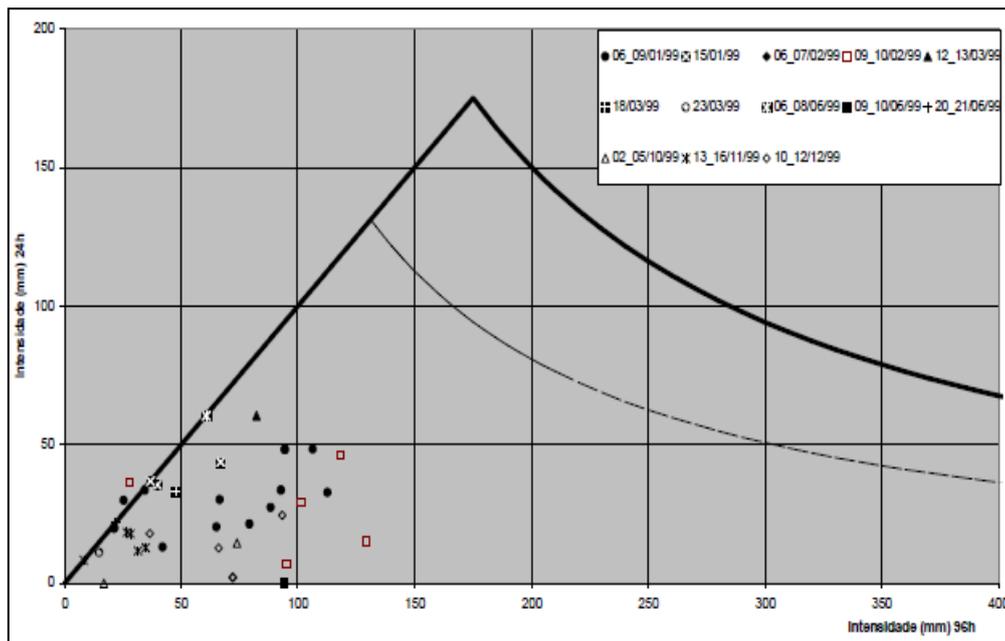


Figura 2.8 - Gráfico de chuva acumulada de 24 horas pela chuva acumulada de 96 horas com a representação dos eventos de precipitação para o ano de 1999 (d’Orsi et al., 2000).

2.3 SISTEMAS DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA

A elaboração de modelos de avaliação de susceptibilidade cada vez mais complexos fundamentados em métodos quantitativos foi permitida pelo uso de Sistemas de Informação Geográfica (SIG), uma vez que propicia o cruzamento de um grande número de temas cartográficos e a análise estatística da relação entre os deslizamentos identificados e as variáveis independentes espacializadas (Reis et al., 2003). Na presente seção, serão explanados aspectos gerais sobre sistemas de informação geográfica na tentativa de contextualizá-lo na presente pesquisa.

2.3.1 GEOPROCESSAMENTO

Segundo Câmara & Davis (2001), uma parte relevante das atividades das sociedades organizadas sempre foi representada pela aquisição de dados sobre a distribuição geográfica de recursos naturais e bens. Tal ocupação, até pouco tempo atrás, era realizada por meio de mapas e documentos impressos, o que dificultava uma análise combinada e simultânea de várias informações. Isto, no entanto, mudou na segunda metade do século passado com o advento da tecnologia da informática, que proporcionou o armazenamento e a representação de tais informações em ambiente computacional.

Desta forma, pode-se atribuir ao termo geoprocessamento, conforme discorrem Pina & Santos (2000), um aspecto amplo que sugere a união de diversas tecnologias de tratamento e manipulação de dados geográficos por meio de programas computacionais e que vêm

exercendo progressiva influência em áreas de Cartografia, Análise de Recursos Naturais, Transportes, Comunicações, Energia e Planejamento Urbano e Regional (Câmara & Davis, 2001). Ainda segundo estes autores, os Sistemas de Informação Geográfica atuam como ferramentas computacionais capazes de realizar análises complexas, uma vez que incorpora informações de fontes variadas e cria bancos de dados georreferenciados, com a possibilidade ainda de automatizar a confecção de documentos cartográficos.

2.3.2 CARACTERÍSTICAS DE UM SIG

Definem-se Sistemas de Informação Geográfica como sistemas computacionais utilizados na compreensão dos fatos e fenômenos que se processam no espaço geográfico (Pina & Santos, 2000). Burrough (1986) citado por Soares (2003) afirma que se pode considerar um SIG como um conjunto poderoso de ferramentas capaz de reter, armazenar, recuperar, transformar e apresentar informações espaciais da realidade.

Corroborando com os conceitos anteriormente mencionados, Câmara & Davis em 2002 citados por Soares (2003) determinam que sistemas que processam computacionalmente dados geográficos e os recuperam não somente por meio em suas características alfanuméricas, mas usando também sua localização espacial, são denominados Sistemas de Informação Geográfica, de forma que isto só é praticável caso a geometria e atributos dos dados estiverem localizados na superfície terrestre e representados em uma projeção cartográfica. Conforme Pina & Santos (2000), o SIG apresenta-se como uma ferramenta essencial para manipulação de dados geográficos em virtude de sua aptidão de concentrar uma grande quantidade de informações convencionais de expressão espacial de maneira estruturada, juntando-as apropriadamente.

Scholten & Stillwell em 1990, citados por Pina & Santos (2000), destacam que os Sistemas de Informação Geográfica propiciam três funções principais, as quais requerem vários componentes, dependendo do objetivo pretendido com o sistema:

- Armazenamento, manejo e integração de grandes quantidades de dados referenciados espacialmente;
- Fornecer meios para realizar análises relacionadas especificamente a componentes geográficos dos dados;
- Organização e o manejo de grandes quantidades de dados e a forma como estas informações podem ser facilmente acessadas por todos os usuários.

Pina & Santos (2000) ainda destacam alguns dos benefícios mais comuns atrelados ao uso dos sistemas de informação geográfica:

- Melhor armazenamento e atualização dos dados;
- Recuperação de informações de forma mais eficiente;
- Produção de informações mais precisas;
- Rapidez na análise de alternativas;
- A vantagem de decisões mais acertadas.

2.3.3 ESTRUTURA DE UM SIG

Conforme Davis & Câmara (2001), um SIG possui, de maneira geral, os seguintes componentes:

- Interface com usuário;
- Entrada e integração de dados;
- Funções de consulta e análise espacial;
- Visualização e plotagem;
- Armazenamento e recuperação de dados (organizados sob a forma de um banco de dados geográficos).

As partes citadas interagem de forma hierárquica, sendo que o nível que se mostra mais próximo do usuário, referente à interface homem-máquina, define a maneira como o sistema é operado e controlado. As ferramentas de processamento de dados espaciais (entrada, edição, análise, visualização e saída) de um SIG encontram-se a um nível intermediário, e um sistema de gerência de banco de dados geográficos se faz presente no seu nível mais interno, permitindo armazenamento e recuperação dos dados espaciais e seus atributos. Todos os subsistemas listados devem integrar um SIG, mesmo sendo distinta a forma de implementação destes componentes em cada sistema em função dos objetivos e necessidades que cada um requer.

2.3.4 TIPOS DE DADOS

Segundo Pina & Santos (2000), uma coleção estruturada de dados digitais espaciais constitui a base de dados dos SIG, que apresentam como atributo básico o fato de serem formados por duas componentes díspares:

- Gráfica (mapas): consiste na descrição gráfica do objeto tal como exposto em um mapa, representando a localização, as feições geográficas e os relacionamentos espaciais entre as feições;

- Alfanumérica (tabelas): reproduzem as características, as qualidades ou relacionamentos de feições na representação cartográfica de forma a descrever os eventos e fenômenos, tanto sociais quanto naturais, existentes no mapa.

As autoras ressaltam a importância da determinação dos dados que verdadeiramente se apresentem como pertinentes para a elaboração da aplicação, uma vez que tanto o procedimento de coleta de dados é caro, como a grande quantidade de informações dificulta o uso daquelas que realmente importam.

Tem-se que os dados de características gráficas são, na maior parte dos programas de SIG, organizados por meio de planos de informação (layers), sob a forma de uma série de camadas, cada uma das quais contendo feições gráficas ligadas espacialmente. Cada camada engloba um conjunto de feições homogêneas que representam um tema ou uma classe de informação, de forma a se relacionar com as demais camadas por meio de um sistema de coordenadas em comum. A definição da organização dos planos de informação é realizada por meio dos temas de interesse de estudo, sendo que tal coordenação evidencia a estratificação das informações em camadas ou níveis diferentes, estabelecendo eficiência e flexibilidade no acesso. Um exemplo de organização de informações gráficas por meio de planos de informação é representado na Fig. 2.9.

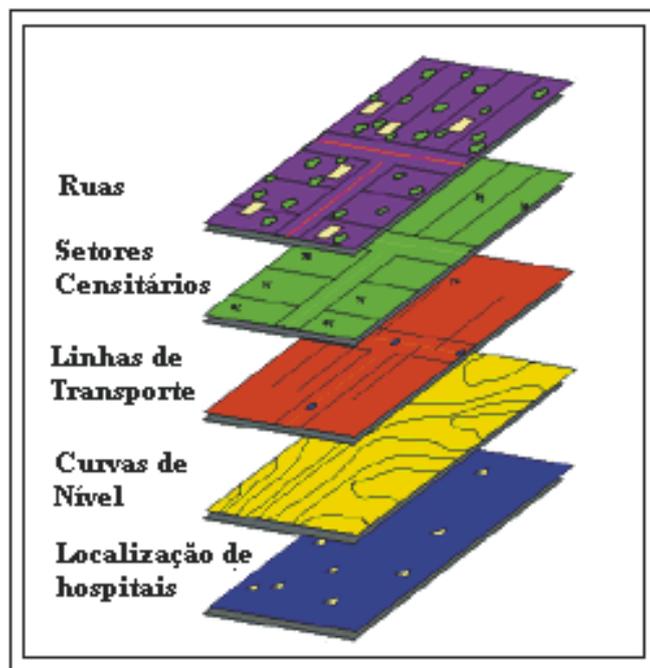


Figura 2.9 – Representação da organização de dados em planos de informação (Pina & Santos, 2000).

A principal característica dos dados que são utilizados em geoprocessamento é a sua diversidade em relação às fontes geradoras e às formas encontradas (García, 2004). Câmara & Monteiro (2001) estabelecem que os tipos de dados utilizados em geoprocessamento podem ser classificados nas categorias temática, cadastral, rede, modelo numérico do terreno e imagem.

A distribuição espacial de uma característica geográfica, representada de maneira qualitativa, é descrita por dados do tipo temático. Estas informações podem ser incorporadas ao sistema por meio de classificação de imagens ou por digitalização. Como exemplo, a Fig. 2.10 representa um mapa temático referente ao uso do solo.

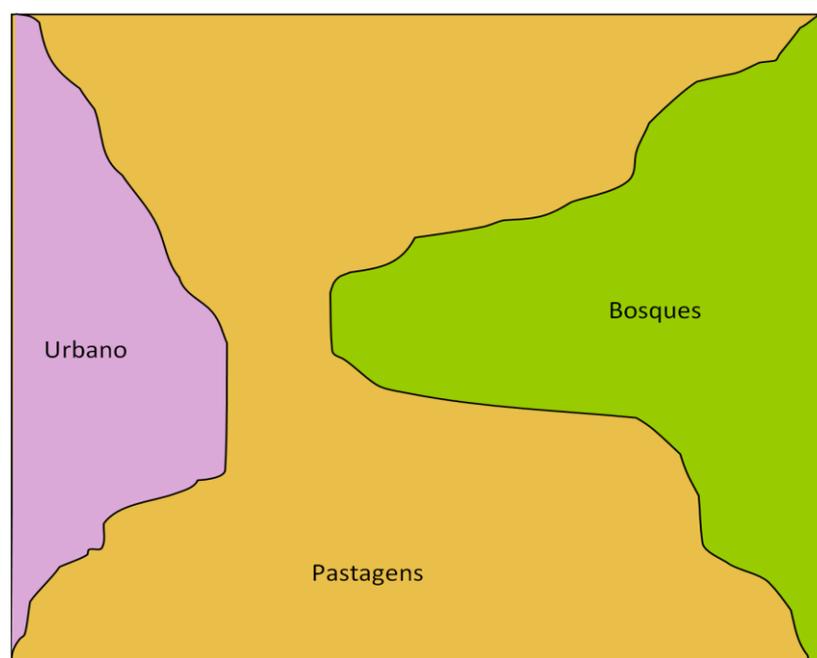


Figura 2.10 – Exemplo de mapa temático de uso do solo (García, 2004).

Com relação aos dados cadastrais, cada elemento deste tipo de dado representa um objeto geográfico que pode se associar a várias representações gráficas e que possui atributos, os quais são registrados em um sistema de banco de dados.

Informações atreladas a serviços de utilidade pública, a redes de drenagem ou rodovias referem-se, em geoprocessamento, ao conceito de “rede”. Nestes casos, cada objeto geográfico encontra-se vinculado a atributos descritivos existentes no banco de dados e apresenta uma localização geográfica exata. Para a representação de uma grandeza que se modifica continuamente no espaço, utiliza-se o termo modelo numérico do terreno ou a sigla MNT. A definição de um MNT pode ser compreendida como um modelo matemático que retrata uma superfície real a partir de algoritmos e uma coleção de pontos (x,y), em um

referencial qualquer, compostos por atributos de z, que reproduzem a variação contínua da superfície. Burrough em 1986, citado por Câmara & Monteiro (2001) destaca entre os diversos usos de modelos numéricos, aqueles relativos ao armazenamento de dados de altimetria para gerar mapas topográficos, às análises de corte-aterro para projeto de estradas e barragens e ao cálculo de mapas de declividade e exposição auxiliares nas análises de geomorfologia e erodibilidade.

Segundo García (2004), o MNT é imprescindível na elaboração de modelos de predição de zonas susceptíveis, uma vez que os mapas de declividade e característica da encosta podem ser derivados a partir do MNT proveniente da topografia. A Fig. 2.11 exemplifica um MNT.

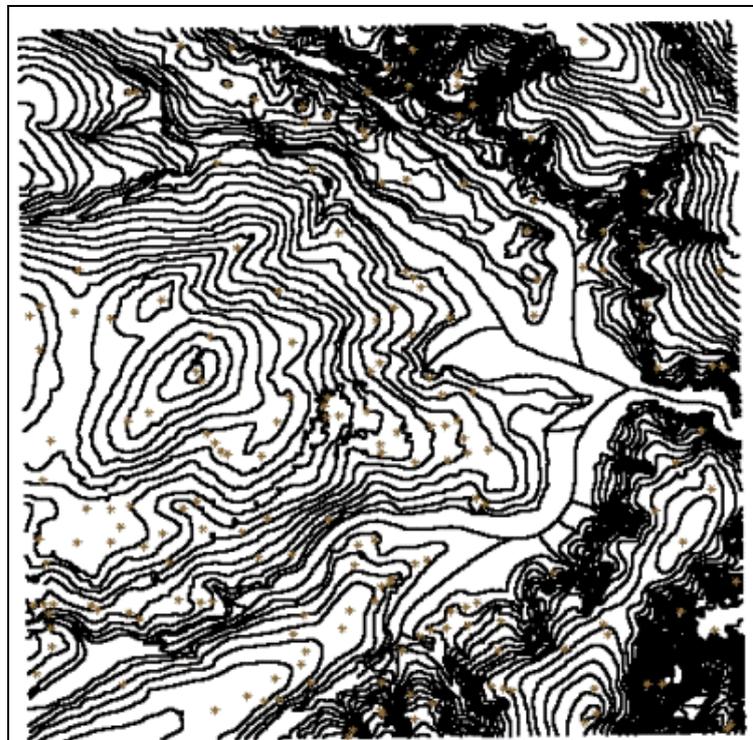


Figura 2.11 - Exemplo de modelo numérico do terreno composto por isolinhas de topografia (Câmara & Monteiro, 2001).

As imagens constituem-se em maneiras de captura indireta da informação espacial. Obtidas por satélites, fotografias aéreas ou "scanners" aerotransportados, estes tipos de dados são armazenados como matrizes, sendo que cada elemento constituinte da imagem, chamado de pixel, possui um valor proporcional à energia eletromagnética refletida ou emitida pela área da superfície terrestre correspondente. É necessário utilizar técnicas de fotointerpretação e classificação para individualizar os objetos geográficos, já que, em virtude do processo de obtenção de imagens, estes objetos estão contidos nas mesmas. Uma imagem proveniente de satélite relativa à região de Manaus é mostrada pela Fig. 2.12.

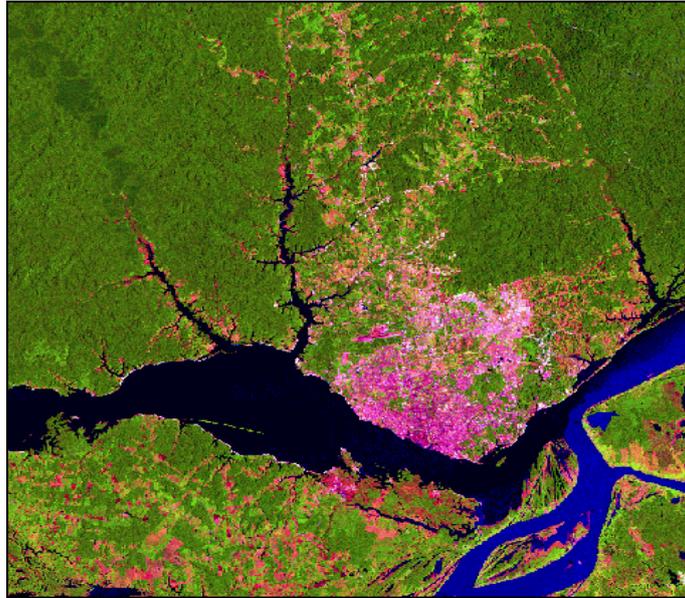


Figura 2.12 – Exemplo de imagem para a região de Manaus (Câmara & Monteiro, 2001).

2.3.5 ESTRUTURA E MODELAGEM DOS DADOS GEOGRÁFICOS

Conforme Soares (2003), a modelagem lógica de dados, a qual expressa a representação geométrica dos dados, é constituída pela maneira como a informação espacial é tratada nos sistemas de informação geográfica.

Segundo Ribeiro et al. (2000), para a representação da realidade em um ambiente SIG, as conotações vetoriais e matriciais se sobressaem, de modo que o modelo de dados vetorial se emprega melhor na representação precisa da localização, dos limites e das formas das feições discretas, tais como rios e divisões geopolíticas. Nesta representação, toda entidade ou elemento gráfico de um mapa é transformado em três formas primárias: pontos, linhas ou polígonos (Câmara & Monteiro, 2001). Já o modelo matricial propicia a representação de fenômenos que possuam uma variação contínua ao longo do espaço geográfico estudado, valendo-se, para tanto, de uma malha regular de células quadradas, permitindo a reprodução de dados como altitude, teor de matéria orgânica e disponibilidade hídrica (Ribeiro et al., 2000).

De maneira comparativa, evidencia-se que nenhuma das estruturas é ideal em todas as situações e que a escolha de uma das estruturas compreende essencialmente no objetivo do estudo do projeto. Desta forma, quando o trabalho foca-se na distribuição espacial de objetos, no desenvolvimento de análises de redes e no conhecimento acerca dos relacionamentos espaciais entre objetos, a arquitetura vetorial destaca-se. Ao passo que caso o projeto concentre-se na variabilidade espacial de um fenômeno, a estrutura matricial é a mais adequada (Pina & Santos, 2000).

3 GENERALIDADES SOBRE A ÁREA DE ESTUDO

São apresentados neste capítulo os aspectos gerais da área de estudo (Município do Rio de Janeiro, Brasil) no intuito de situá-la, tanto do ponto de vista geográfico, quanto em relação a características do espaço natural, uma vez que estes fatores foram contemplados no desenvolvimento da presente pesquisa.

3.1 LOCALIZAÇÃO E CARACTERÍSTICAS DA ÁREA DE ESTUDO

O estado do Rio de Janeiro encontra-se situado na parte leste da região Sudeste do Brasil, ocupando uma área de 43.696 km². Sua capital, homônima, localiza-se entre os paralelos 22°45'05"S e 23°04'10"S e os meridianos 43°06'30"W e 43°47'40"W, estando delimitada ao norte pelo Maciço do Gericinó-Medanha, ao sul pelo Oceano Atlântico, a leste pela Baía de Guanabara e a oeste pela baía de Sepetiba. A Fig. 3.1 situa o município do Rio de Janeiro, mostrando também as unidades limítrofes a ele, bem como os municípios adjacentes.

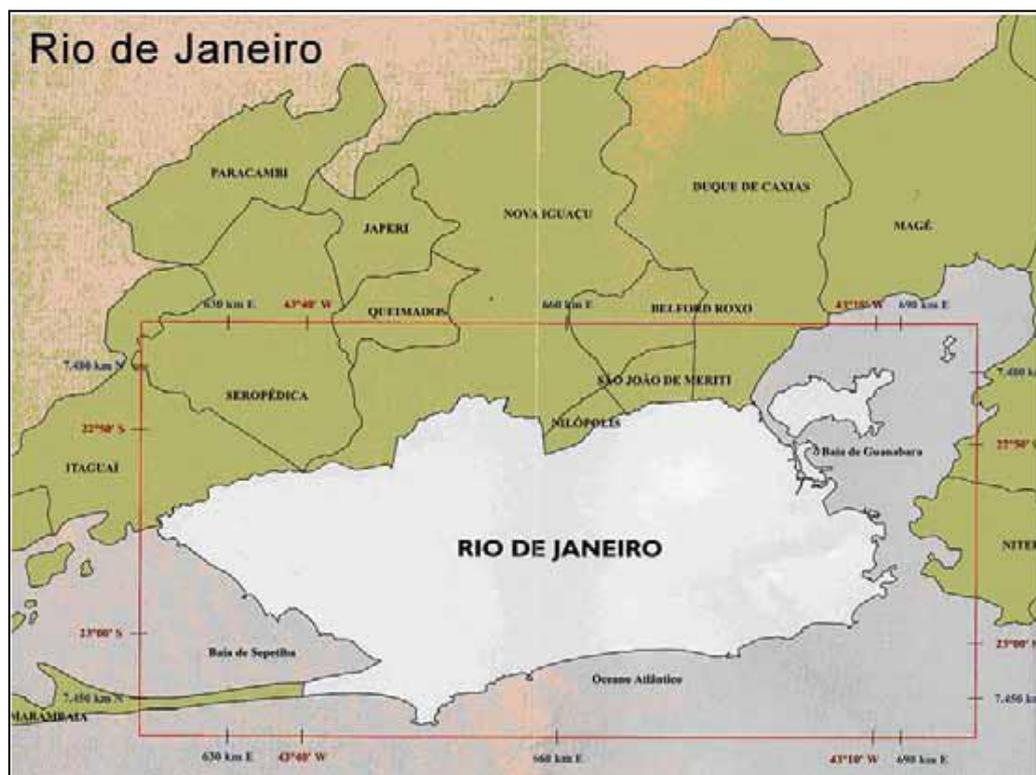


Figura 3.1 – Localização do município do Rio de Janeiro e municípios adjacentes (Ministério da Saúde, 2005).

Com uma área territorial de 1.224,56 km², o município do Rio de Janeiro possui 6.320.446 habitantes residentes (Armazém de Dados, 2010), constando um total de 160

bairros que se encontram divididos administrativamente em cinco áreas de planejamento e 33 regiões administrativas (Instituto Pereira Passos, 2005).

A Área de Planejamento 1 engloba o centro histórico, bem como os bairros que foram urbanizados na primeira metade do século XIX, em consequência do crescimento e das modificações imprimidas pela chegada da côrte em 1808. Corresponde a 2,8% do território municipal, sendo formada por quinze bairros e abrigando as regiões administrativas intituladas São Cristóvão, Portuária, Centro, Rio Comprido, Paquetá e Santa Teresa. Situando-se geograficamente entre o Maciço da Tijuca e o mar, a Área de Planejamento 2 distribui-se pelas regiões administrativas de Botafogo, Copacabana, Lagoa, Tijuca, Vila Isabel e Rocinha, sendo formada por 25 bairros e com um território que corresponde a 8,2% do município. A Área de Planejamento 2 possui 52% de sua área acima da cota 100 m, consistindo em alvo da ocupação irregular por parte da população de baixa renda, que toma posse especialmente das encostas pela incapacidade de conseguir obter uma moradia regular, contribuindo para a degradação ambiental e pela depreciação dos imóveis no seu entorno.

A Área de Planejamento 3 é composta por 80 bairros, apresentando 16,6% da área total do Rio de Janeiro. Caracteriza-se pela sua localização próxima da região metropolitana, abrangendo importantes acessos à cidade, como a Avenida Brasil e o Aeroporto Internacional Antônio Carlos Jobim, bem como uma vasta rede de infraestrutura como complexos comerciais, industriais, militares, centros de abastecimento, estações ferroviárias e metroviárias. É palco também de grandes conjuntos habitacionais e áreas de fragilidade urbana, como, por exemplo, o complexo do Alemão, Maré e Jacarezinho, o que corresponde setores críticos de segurança instalados nos corredores próximos às grandes favelas e aos complexos. Associado a isto, soma-se a falta de áreas verdes, espaços culturais, esportivos e de lazer, conjuntamente com a ausência de manutenção do espaço público e a fragmentação dos bairros pelas linhas metroviárias e férreas. As regiões administrativas associadas são: Anchieta, Pavuna, Vigário Geral, Ilha do Governador, Madureira, Irajá, Penha, Ramos, Complexo do Alemão, Inhaúma, Méier, Jacarezinho e Maré.

Compreendida por uma longa área de baixada delimitada pelos maciços da Pedra Branca e da Tijuca e pelo oceano Atlântico, a Área de Planejamento 4 corresponde a 24% da extensão do município com Jacarepaguá, Barra da Tijuca e Cidade de Deus como regiões administrativas e com dezenove bairros presentes na sua formação. A atratividade da região é conferida pela extensa faixa litorânea e pelos estabelecimentos de comércio existentes na região. Em contrapartida, problemas relacionados à poluição dos cursos d'água e lagoas se

tornam mais danosos, em virtude da rapidez com que se desenvolve a ocupação, sem que haja a incorporação de obras de infraestrutura necessárias.

A zona oeste da cidade corresponde à Área de Planejamento 5, possuindo na sua composição 20 bairros e cinco regiões administrativas: Bangú, Campo Grande, Santa Cruz, Guaratiba e Realengo. Abrangendo 48,4% do território municipal, foi considerada como a última fronteira da urbanização do Rio de Janeiro, sendo que sua ocupação procedeu-se de maneira paulatina e é evidenciada pelo aumento populacional da região, demonstrado em um crescimento entre os anos de 1970 e 2000 de 124,3%.

3.2 GEOLOGIA

Amaral (1997) afirma que diversas feições geológicas exercem o papel de condicionantes de escorregamentos nas encostas, o que define a localização e a tipologia do acidente. Segundo Soares (2006), a partir do levantamento geológico do Estado do Rio de Janeiro é possível classificá-lo em duas unidades morfoestruturais denominadas Cinturão Orogênico do Atlântico e Bacias Sedimentares Cenozóicas. Em se tratando da natureza do material rochoso que compõe o município carioca, pode-se estabelecer que, segundo Pedrosa (1994), as rochas que predominam são referentes às categorias metamórficas, magmáticas e sedimentares.

Destaca-se que, entre as rochas metamórficas, a ocorrência predominante se refere aos gnaisses, de forma que este conjunto encontra-se exposto, de forma mais proeminente, no Maciço da Tijuca e em regiões a ele periféricas pertencentes às colinas relacionadas e à planície litorânea, regiões as quais possuem grande densidade populacional. É composto por vários tipos de litologia, cuja composição mineralógica é variável e evidenciando diferentes tipos de deformação geológica, sendo que há uma significativa variabilidade por parte dos materiais de alteração e das coberturas relacionadas como consequência da estruturação geológica e de agentes como o relevo e o clima.

Uma divisão das rochas metamórficas presentes na cidade do Rio de Janeiro é mostrada por Penha (2000a), de forma a sistematizá-las, classificando-as em uma Série Inferior, com idade mais antiga e uma Série Superior, mais recente. A Série Inferior é representada por gnaisses granodioríticos a quartzo-dioríticos, os quais apresentam estrutura complexa e xistosidade mal definida associados à migmatitos. Estas estruturas têm ocorrências nas zonas norte e oeste da cidade e nas Ilhas do Fundão e do Governador, atreladas a corpos migmáticos intermediários e máficos gnaissificados. O maior número de gnaisses constituintes das encostas do Rio de Janeiro e, especificamente, do maciço da Tijuca

é contido pela Série Superior, a qual possui as rochas de maiores variações do ponto de vista textural, composicional e estrutural, de forma que este aspecto se faz presente no comportamento geomecânico, tanto das massas rochosas, quanto dos solos residuais delas provenientes. O arranjo geológico do maciço da Tijuca encontra-se associado a estas litologias de maneira que estas exercem uma ação expressiva sobre sua morfologia, evolução de suas encostas e nos processos geodinâmicos de risco, quando confrontados aos outros maciços pertencentes ao município. A série em questão abrange como componentes leptinitos, plagioclásio-gnaisses, microclina-gnaisses ou gnaiss facoidal, biotita-gnaisses e kinzigitos. Segue uma breve descrição destes litotipos gnáissicos principais do município do Rio de Janeiro:

- Leptinitos - São gnaisses quartzo-feldspáticos, leucocráticos, localmente bandados, laminados, com granulação fina, e de coloração amarelada a cinza clara, tendo sua ocorrência principalmente na encosta meridional da serra da Carioca, estendendo-se a partir de Santa Teresa até além do Corcovado.
- Plagioclásio Gnaiss - Consiste em uma rocha de granulação média a grossa, com coloração escura acinzentada e apresentando em sua constituição quartzo, feldspato, biotita e localmente hornblenda. Análogo ao Gnaiss Acher, seu afloramento pode ser observado em bairros da zona norte do Rio, como Inhaúma, Morro dos Telégrafos, Méier, Serra do Engenho Novo e em parte de Jacarepaguá, na Floresta da Tijuca, no Morro do Archer, Serrinha e Joá.
- Gnaiss Facoidal – Possuem granulação grosseira, com cor que varia de rosa ao cinza claro e apresentando grandes lentes de feldspato creme ou róseo, composto geralmente de microclina, que em muitos casos encontram-se bem orientados, destacando-se entre as camadas de biotita. Esta litotipo estabelece contatos gradacionais com leptinitos e com o biotita gnaiss, sendo que, em determinados pontos, a ligação com os gnaisses citados mostra-se de maneira abrupta, de forma similar a um intrusivamento ígneo.
- Kinzigito – Refere-se a um gnaiss leuco a mesocrático de coloração rosada e granulação grosseira. Apresenta foliação bem desenvolvida, podendo-se encontrar lentes e/ou camadas, com espessura variando de centímetros a metros, de rochas calciossilicáticas, leptinitos e quartzitos de caráter local. A significativa existência de aluminossilicatos, como o caso da granada, cordierita e sillimanita, é o que confere distinção das demais litologias, estabelecendo ainda associação com o Biotita Gnaiss,

sendo que esta transição ocorre gradativamente. A Serra da Carioca, na encosta oriental do Maciço da Tijuca representa a região mais expressiva de ocorrência deste material.

- Biotita Gnaiss - Apresenta estrutura típica gnaissica, granulação fina a média com cor variando de cinza claro a cinza escuro. Em alguns casos, como na escarpa norte do Maciço da Tijuca, mostra-se granatífero e com várias interposições de quartzito puro ou feldspático, de espessura variável, as quais podem oscilar de centímetros a metros. Mostra-se como um gnaiss bem laminado na forma de quartzítico, de forma a ser encontrado no Alto da Boa Vista, em domínio do Biotita Gnaiss e também como camadas quartzosas no Leblon.

As rochas magmáticas mais significativas que compõem a litologia na cidade do Rio de Janeiro também são destacadas quanto às suas características e locais de ocorrência:

- Metagabro da Tijuca – Rocha magmática, maciça ou podendo apresentar ligeira foliação, de composição gabroica a diorítica, ligeiramente metamorfisada, com granulometria variando de média a grossa e possuindo cor preta. Tem ocorrência na Floresta da Tijuca, possuindo suas maiores exposições especificamente nas vizinhanças da estrada do Soberbo, sendo que se encontra contido quase totalmente pelo Granito Favela. Segue-se a existência de uma maneira particular na alteração do Metagabro em se tratando especialmente de blocos arredondados de rocha levemente alterada ou fresca, que possui ao seu redor uma massa de solo areno siltoso, o que proporciona uma feição de depósito coluvionar ou tálus.
- Granodiorito Pedra Branca – Localiza-se entre as planícies de Bangú, Jacarepaguá e Campo Grande, encontrando-se vastamente presente no Município do Rio de Janeiro, de forma que as serras do Quilombo, Nogueira, Barata, da Pedra Branca e Bangú encontram-se vinculadas a esta rocha. Grandes campos de matações, bem como deslocamentos que se processam por meio de juntas de descompressão, impondo a massa rochosa uma estratificação aparente, são aspectos corriqueiros associados ao litotipo.
- Granito Utinga – Ocorrem de maneira significativa na encosta oeste do Maciço da Tijuca, na Serra do Alemão, na vertente do bairro de Jacarepaguá, na Serra da Misericórdia e no Complexo do Caricó, sendo que no gnaiss facoidal das cercanias da estrada Grajaú-Jacarapaguá é possível encontrar pequenas lentes deste granitóide. Sua

presença é associada sob a forma de pequenas ocorrências ou por meio de injeções concordantes a subconcordantes com o Gnaisse Archer.

- Granito Favela - Refere-se a um granito situado de forma preferencial no parte norte-nordeste do Maciço da Tijuca, Engenho Novo e Serra dos Pretos Velhos como diques, estruturas tabulares que geram cimeiras capazes de suportar o intemperismo no topo dos morros ou pequenas intrusões. Se expressa normalmente como diques com espessura variante e baixo ângulo de mergulho. Em encostas, é responsável pela presença de extensos campos de matações arredondados ou facetados que representam um perigo potencial à população à jusante e em elevações podem proporcionar a queda de blocos. Nas serras de Bangú e Barata na zona oeste da cidade pode-se observar feições em forma de torres características destes granitos bem diaclasados compostas por um amontoado de blocos bem delimitados, empilhados em suas posições originais uns sobre os outros de forma a destacar-se repentinamente de um declive ou de um topo consideravelmente plano.
- Diabásio - Com a possibilidade de estenderem-se por dezenas de quilômetros, tais rochas configuram-se sob a forma de diques, podendo apresentar espessuras que variam de centímetros a vários metros. Podem ter uma granulação grosseira em diques de grande espessura semelhante ao gabro. Todas as rochas cristalinas do município, granitos e gnaisses, são transpassadas pelo diabásio sob a forma de diques, já que este tem idade Mesozóica, com exceção das rochas alcalinas, as quais são mais jovens. Relevos baixos, retilíneos onde se encaixa a drenagem, exemplificado pelo Rio Cachoeira/Rio Maracanã no maciço da Tijuca, determinam a morfologia dos diques de diabásio no Rio de Janeiro.
- Sienito Nefelínico ou Foiaito – Faz-se presente na porção norte do município, na região da Serra de Madureira ou Medanha-Gericinó e no Morro do Marapicu. Configura-se como uma rocha alcalina plutônica, leucocrática, cinza clara, de granulação grossa e homogênea, possuindo um aspecto semelhante ao granito, mas diferindo deste pelo fato de não possuir quartzo na sua composição.

Comuns nas zonas de baixadas e planícies, as rochas sedimentares seriam representadas por leitos de arenito, siltitos, argilitos e folhetos (Pedrosa, 1994).

3.3 GEOMORFOLOGIA

Conforme Fernandes et al. (2006), dois conjuntos geomorfológicos, os quais distinguem-se entre si de maneira inegável, compõem o território pertencente à cidade do Rio de Janeiro. Estas formações em questão são formadas pelos maciços litorâneos e pelas regiões de baixada, sendo possível, ainda, inserir neste conjunto alguns morros isolados. Neste contexto, pode-se ressaltar que 36% do relevo é constituído por montanhas e os 64% restantes são formados por planícies e bases de encostas.

Segundo Pedrosa (1994), as cadeias montanhosas da cidade são representadas por três grandes grupos de maciços espaçados por extensas baixadas e que são provenientes de movimentos epirogenéticos do complexo cristalino. Tais conjuntos montanhosos são o maciço da Tijuca, o maciço da Pedra Branca e o maciço Marapicú-Gericinó. Na Fig. 3.2 encontram-se as diferentes unidades geomorfológicas presentes no município do Rio de Janeiro.

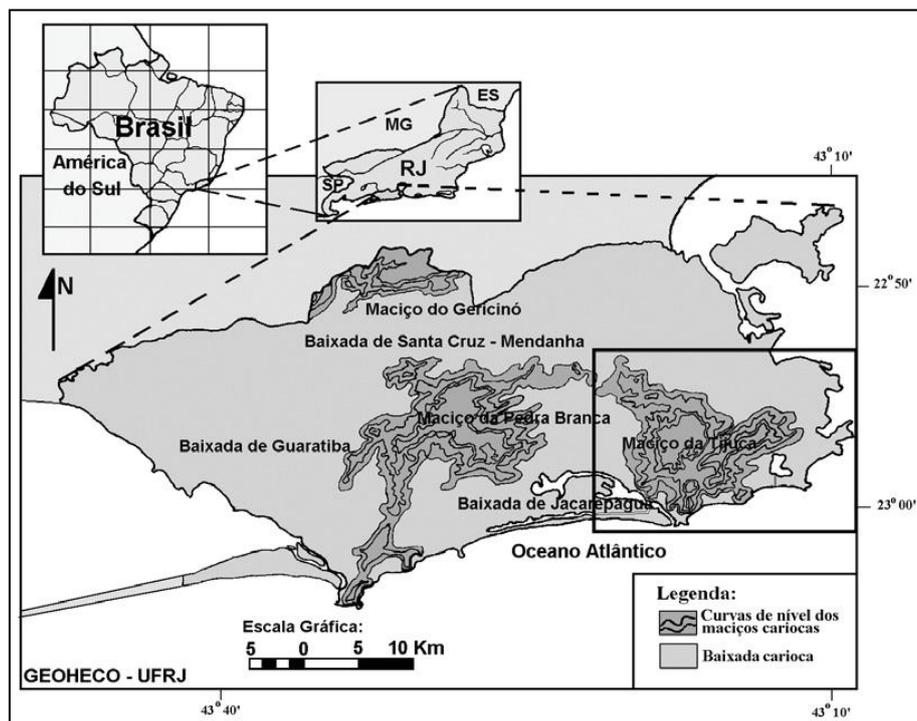


Figura 3.2 – Localização dos compartimentos geomorfológicos do município do Rio de Janeiro (Fernandes, 1998 citado por Fernandes et al., 2006).

O maciço da Tijuca divide as zonas sul, norte e oeste do município, situando-se entre o litoral e as baixadas fluviomarinhas, de forma que atua como uma região dispersora de águas entre as baixadas de Jacarepaguá e Guanabara. Com uma extensão de 105,9 km², apresenta como pontos mais elevados o Pico da Tijuca com 1.021 m acima do nível do mar, o Pico do

Papagaio que possui 989 m e o Pico do Andaraí, com 900 m. Conforme Dantas (2000), o maciço da Tijuca é caracterizado pelo alinhamento de cristas na direção Sudoeste-Nordeste, a exemplo da Serra da Carioca (700 m), e pela associação de pequenos alinhamentos serranos, como o Alinhamento Morro dos Cabritos-Pão-de-Açúcar, ao sul, ou a serra da Misericórdia, ao norte. Ainda segundo Dantas (2000), os lineamentos estruturais do substrato geralmente determinam a rede de drenagem, como se procede nos vales dos rios Maracanã e Cachoeira, concedendo à drenagem um padrão que varia de dendrítico a regular.

Situado na zona oeste do município próximo do litoral e apresentando uma área de 152,1 km², o maciço da Pedra Branca propicia a dispersão de águas entre as baixadas de Sepetiba e Jacarepaguá. Possuindo picos elevados, tem como seu ponto mais alto o Pico da Pedra Branca, com uma altitude de 1.024 m acima do nível do mar, o qual representa também o ponto mais alto do município, segundo dados do setor de cartografia do Instituto Pereira Passos. Na sua região central, o maciço demonstra uma feição dômica que lhe é proporcionada pelo fato de estar sustentado na maioria de sua extensão por rochas graníticas ou granitóides, evidenciando um padrão de drenagem centrífugo e dendrítico com densidade alta. Um alinhamento prolongado de direção sudoeste-nordeste constitui a parte sudoeste do maciço, a qual alcança diretamente o oceano Atlântico, contíguo às localidades de Grumari e Barra de Guaratiba, sendo que as serras do Cantagalo (254 m) e da Paciência (202 m), que representam alinhamentos isolados, são consideradas uma continuação do maciço no interior da baixada de Sepetiba.

Possuindo altitudes que suplantam 800 m, como a serra da Madureira (940 m), o maciço do Gericinó, também denominado como Medanha, é um maciço montanhoso isolado com área de 35,7 km², localizado na região norte do município do Rio de Janeiro, na divisa com Nova Iguaçu, que possui um formato dômico alongado na direção sudoeste-nordeste, com cristas paralelas e exibindo um padrão de drenagem atrelado à rede de fraturamento, podendo este ser de dendrítico a retangular. Limita-se de maneira brusca com elevações isoladas e as baixadas fluviomarinhas, de forma a agir como uma zona de dispersão de águas entre a Baixada Fluminense e a zona oeste do município do Rio de Janeiro. Pertencendo a esta unidade geomorfológica, o morro do Maripicú (620 m) possui a forma exemplar de um cone vulcânico conservando estruturas anelares e sendo constituído por uma intrusão de rochas alcalinas situada um pouco a sudoeste da estrutura intrusiva principal (Dantas, 2000).

Conforme Pedrosa (1994), existem elevações isoladas consideradas importantes, além das três estruturas citadas anteriormente e que possuem altitudes que não ultrapassam 250 m,

como a Pedra da Babilônia, Juramento, Telégrafo, Sapê e Penha presentes na zona norte e morros da Viúva, Urubus, Panela e Camorim na zona sul.

Em relação às planícies costeiras, a baixada de Jacarepaguá ocupa a parte noroeste do município correspondendo uma pequena área de acumulação fluviomarinha que se encontra cercada pelos maciços da Tijuca e da Pedra Branca, onde se localizam os bairros da Barra da Tijuca e de Jacarepaguá. Destaca-se também a existência das baixadas das Baías de Guanabara e Sepetiba, sendo que a primeira se encontra na parte nordeste do município e a segunda na porção oeste. Segundo Dantas (2000), extensas planícies colúvio-aluviais constituem o aspecto morfológico predominante nestas regiões, de forma que as superfícies aplainadas destas baixadas alteram-se por um relevo de colinas e morros isolados por sedimentos fluviais ou rampas de colúvio, ou atravessadas pelas planícies fluviais dos rios principais à medida que estas planícies tornam-se próximas das escarpas serranas.

4 METODOLOGIA

A metodologia utilizada no presente trabalho concentrou-se em obter e examinar informações pertinentes que proporcionassem a análise e o consequente entendimento da relação entre chuvas e escorregamentos no município do Rio de Janeiro. O foco da abordagem desenvolvida pautou-se na busca de uma metodologia capaz de averiguar a possível interação entre as séries históricas de chuvas ocorridas na região de estudo e os registros de acidentes geotécnicos deflagrados por precipitações.

Conjuntamente, a inserção nesta análise de condicionantes ambientais do município, como geologia, uso do solo, altimetria e declividade, buscou fornecer a influência destes fatores no desencadeamento dos eventos de deslizamentos, proporcionando um maior embasamento em relação aos resultados obtidos.

Os referidos insumos primários utilizados no trabalho foram obtidos por meio de visita realizada ao Rio de Janeiro, que teve como roteiro os principais órgãos municipais responsáveis pela aquisição, estudo e registro de dados relacionados a eventos de escorregamentos no município. Instituições de ensino superior também foram procuradas no sentido de obter elementos e informações complementares pertinentes, possibilitando a composição de uma estrutura conceitual e teórica sólida, de maneira a enriquecer ainda mais o respectivo trabalho.

O tratamento da extensa gama de dados coletados, com sua natural organização, resultou em um arcabouço conciso, a partir do qual foi passível o estabelecimento de passos metodológicos bem claros que permitiram a extração de novas informações capazes de nortear as inferências instituídas em relação ao foco da pesquisa.

Como ferramentas auxiliares para o tratamento dos dados, programas de computador foram utilizados, tanto para manipulação de informações espaciais por meio de sistemas de informação geográfica, quanto na tarefa de ordenação de dados pluviométricos sob a forma de matrizes, o que permitiu a obtenção das suas mais distintas combinações. Tal fato configurou-se com uma significativa importância, já que, pelo volume das informações manejadas, sem tal artifício o desenvolvimento do trabalho mostrar-se-ia impraticável.

4.1 ORGANIZAÇÃO DE DADOS

A etapa de organização de dados consistiu principalmente na obtenção das informações básicas necessárias para o desenvolvimento da pesquisa, na sua posterior depuração, com a filtragem dos elementos que possuíssem melhor exatidão, e resultou na

organização de um banco de dados, o qual foi corrigido contra a presença de prováveis inconsistências presentes no conjunto inicial de informações. Houve, em decorrência do desenvolvimento desta etapa, a definição de uma área piloto de trabalho.

4.1.1 AQUISIÇÃO DE DADOS

Os subsídios iniciais foram coletados em diversas instituições sem que existisse nesta fase qualquer preocupação com critérios de qualquer espécie, como determinação temporal ou espacial, sendo que a única premissa adotada foi de que as informações conseguidas pertencessem ao município do Rio de Janeiro. O conjunto de dados primários encontra-se relacionado a seguir.

4.1.1.1 INVENTÁRIO DE ESCORREGAMENTOS

Os registros de escorregamentos foram obtidos junto à Fundação Geo-Rio. A instituição elabora relatórios anualmente, nos quais estão compilados os principais acidentes geotécnicos que se processaram nas encostas do município, sendo que estes registros foram extraídos de laudos técnicos embasados por vistorias de campo. Os eventos de escorregamentos presentes no banco de dados da Geo-Rio são aqueles que ocorrem normalmente durante ou após períodos chuvosos.

Para cada registro há informações do acidente correspondente, como localização, hora, data, descrição da ocorrência, tipologia do acidente mediante classificação da instituição, volume escorregado estimado em m³, consequências do acidente, pluviômetro ao qual o evento foi associado e o número do laudo. Um exemplo de registro de escorregamento é mostrado pela Tab. 4.1.

Tabela 4.1 – Registro de acidente geotécnico pertencente à Geo-Rio (d’Orsi, 2002).

| Localização | Data | Hora | Descrição | Classificação | Categoria (m ³) | Consequências | Pluviômetro | Nº do laudo |
|------------------------------|--------|-----------|----------------------------------|---------------|-----------------------------|------------------------------|--------------|-------------|
| Rua XX, nº XX – Santa Teresa | 24/dez | Madrugada | Escorregamento de entulho e lixo | EL/E | 2 | Obstrução parcial de acessos | Santa Teresa | 562/2001 |

Foram obtidos dados de deslizamentos para o período compreendido de 1998 a 2002. Ressalta-se, ainda, que nem todos os registros de acidente disponíveis possuíam todas as informações referentes à ocorrência, sendo que a maioria deixou de apresentar os dados relativos à data e/ou hora. Os registros dos acidentes utilizados no presente trabalho encontram-se listados no Apêndice A.

4.1.1.2 DADOS PLUVIOMÉTRICOS

As informações pluviométricas são provenientes do sistema Alerta-Rio, o qual opera utilizando 32 pluviômetros automáticos instalados de maneira estratégica por toda extensão do município que fornecem registros pluviométricos em tempo real e a cada quinze minutos para uma estação central computadorizada situada na sede da Fundação Geo-Rio, em Campo de São Cristóvão, zona norte da cidade.

Os registros de chuva encontram-se disponíveis para pesquisa no endereço eletrônico do sistema Alerta-Rio, sendo que a base de dados existe a partir do ano de 1997, estando estas informações separadas por ano para cada uma das estações. A localização de cada estação que compõe o sistema juntamente com as suas respectivas cotas altimétricas, encontram-se acessíveis no mesmo endereço eletrônico.

4.1.1.3 DOCUMENTOS CARTOGRÁFICOS

A base cartográfica aqui mencionada está relacionada aos mapas que descrevem a área de estudo no que se refere aos aspectos geográficos, como topografia, geologia, sub-bacias hidrográficas e uso do solo, os quais são originários de trabalhos ou pesquisas anteriores.

A base cartográfica digital da topografia e do mapa geológico-geotécnico foi cedida pela Geo-Rio sob o formato de arquivo com extensão dwg, sendo que o mapa topográfico apresenta curvas de nível a cada 25 m. As unidades que foram constatadas no mapa geológico-geotécnico estão listadas a seguir:

- Vazadouros de lixo;
- Zonas de aterro;
- Formações quaternárias referentes a depósitos aluvionares, marinhos e eólicos;
- Formações terciárias de topo;
- Formações terciárias de encosta;
- Depósito de corridas de massa;
- Depósito de tálus/colúvio;
- Solo residual de topo com espessura maior que 2 m;
- Solo residual de encosta com espessura maior que 2 m;
- Solo residual de topo com espessura inferior a 2 m;
- Solo residual de encosta com espessura inferior a 2 m;
- Blocos residuais;
- Afloramento rochoso fraturado;

- Afloramento rochoso maciço;
- Afloramento rochoso pedreira.

Em relação à carta de uso do solo referente ao ano de 2001 e de sub-bacias hidrográficas, ambas foram conseguidas na página virtual do Instituto Pereira Passos (IPP) denominada Armazém de Dados, sob o formato shapefile. As classes de uso do solo presentes na carta são as seguintes:

- Floresta;
- Floresta alterada;
- Mangue;
- Área úmida;
- Apicum;
- Restinga;
- Campo antrópico;
- Área urbanizada não consolidada;
- Solo exposto;
- Cultura/pastagem;
- Praia;
- Afloramento rochoso;
- Área urbana;
- Parques;
- Águas interiores.

4.1.2 DEPURAÇÃO E ARRANJO DOS DADOS

De posse das informações básicas, fez-se necessário a separação daqueles dados que seriam efetivamente incorporados à análise, uma vez que nem todos os elementos que foram obtidos forneciam características satisfatórias referentes a alguns critérios considerados como essenciais para garantir resultados consistentes.

Estando os dados cartográficos (geológico-geotécnico, uso do solo, sub-bacias hidrográficas e limite municipal) em diferentes extensões, realizou-se a importação destas informações para o software SPRING (Câmara et al., 1996), desenvolvido pelo INPE, com o intuito de padronizá-los e de manipulá-los mais facilmente. Como resultado, os mapas relativos a estes aspectos foram gerados abrangendo todo o município e com as classes explicitadas anteriormente.

Em relação aos registros de escorregamentos, adotou-se como regra de separação para esta categoria a existência de precisão espacial e temporal dos dados. Desta forma, procurou-se selecionar os acidentes que possuíam além da hora e dia definidos (critério temporal), aqueles passíveis de serem georreferenciados a partir do endereço fornecido no relatório da Geo-Rio (critério espacial). Utilizou-se para a determinação das coordenadas dos acidentes o aplicativo Google Earth.

O número total de registros presentes nos relatórios foi contabilizado em 1.079 escorregamentos, sendo que, uma vez imposta uma seleção baseada no critério de hora e data definidas, o número de acidentes reduziu-se a 372. Apenas 172 deslizamentos foram possíveis de serem localizados espacialmente, com a obtenção de suas respectivas coordenadas geográficas. Dentre estes registros que atendem a precisão espacial, 51 eventos não apresentaram a hora definida do momento do acidente.

Os registros espacialmente determinados foram, então, georreferenciados, propiciando uma averiguação da distribuição das ocorrências de deslizamentos por todo o município. Este resultado encontra-se na Fig. 4.1.

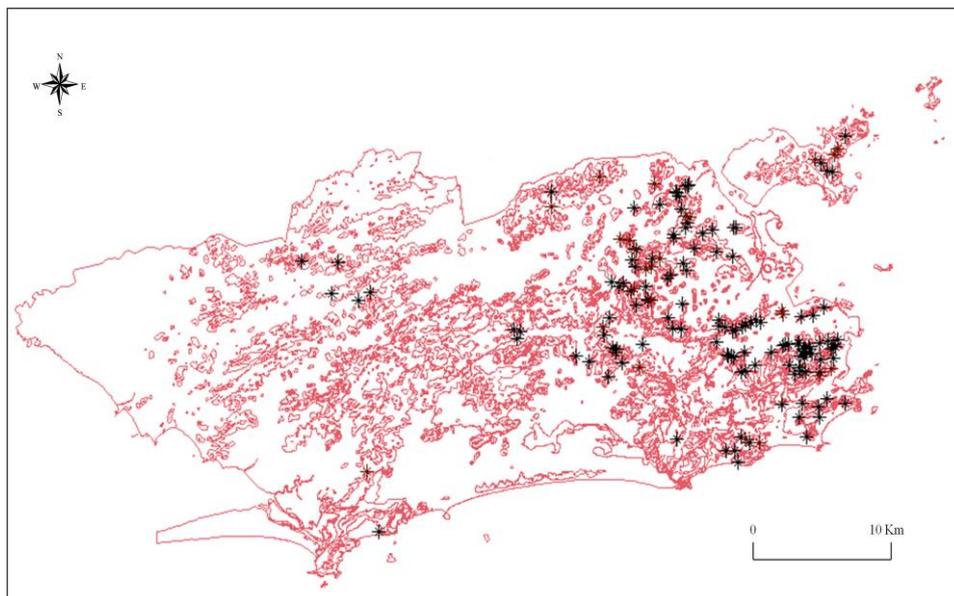


Figura 4.1 – Registros de escorregamentos localizados espacialmente.

Observa-se que a maior concentração de pontos relacionados a escorregamentos está situada nas zonas sul e norte da cidade. Optou-se, com o respaldo deste fato, pela definição de uma sub-região do município denominada de área piloto, na qual as análises da pesquisa seriam desenvolvidas, de forma que se contabilizou para esta extensão 163 registros que se

encontram localizados, o que representa 94% do conjunto para esta classe de acidentes. A Fig. 4.2 mostra a delimitação da área piloto.

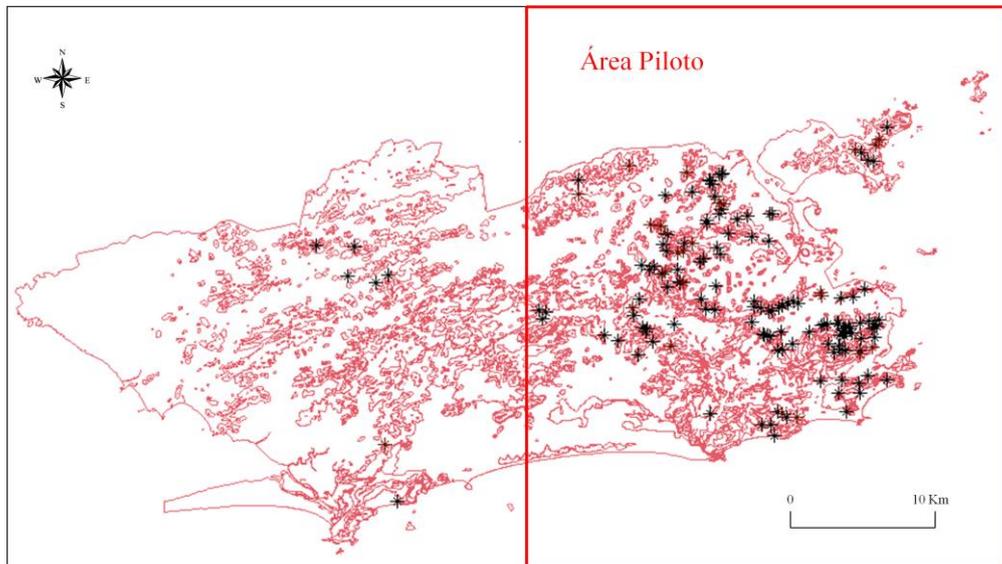


Figura 4.2 – Área piloto de estudo.

A demarcação da área piloto permitiu o tratamento dos dados topográficos apenas para esta região, uma vez que as linhas que representam as curvas de nível encontravam-se de forma descontínua e sem elevação, tornando impraticável a geração de um modelo numérico de terreno. Assim sendo, fez-se necessário primeiramente a união destas entidades e as suas respectivas elevações para as cotas determinadas, de modo que este processo foi realizado manualmente, o que requereu inúmeras horas de trabalho. Após isso, importaram-se as curvas de nível para o SPRING, onde finalmente foram gerados os produtos derivados do MNT representados pelos mapas hipsométrico e de declividades. Na Tab. 4.2 estão mostradas as divisões das classes de declividade com seus respectivos intervalos.

Tabela 4.2 – Definição de intervalos de classes para declividade.

| Classes | Intervalos |
|---------|---------------|
| 1 | 0° a 2° |
| 2 | 2° a 5° |
| 3 | 5° a 10° |
| 4 | 10° a 20° |
| 5 | 20° a 30° |
| 6 | 30° a 50° |
| 7 | Maior que 50° |

Em relação ao mapa hipsométrico, foram consideradas dez classes de elevação para a área piloto, que se encontram listadas na Tab. 4.3.

Tabela 4.3 – Definição de intervalos de classes para hipsometria.

| Classes | Intervalos (m) |
|---------|----------------|
| 1 | 0 – 100 |
| 2 | 101-200 |
| 3 | 201-300 |
| 4 | 301-400 |
| 5 | 401-500 |
| 6 | 501-600 |
| 7 | 601-700 |
| 8 | 701-800 |
| 9 | 801-900 |
| 10 | 901-1000 |

Com a definição da área de estudo propriamente dita, tratou-se de verificar quais estações pluviométricas do sistema da Geo-Rio encontravam-se nesta região com o intuito de, posteriormente, associar cada evento de escorregamento localizado no interior da área piloto a uma determinada estação pluviométrica e, conseqüentemente, a certo conjunto de dados de chuva. Assim, verificou-se a presença de 23 estações pertencentes à área piloto.

A área de influência para cada uma destas estações foi definida pela geração dos respectivos polígonos de Thiessen. Houve a modificação de alguns polígonos, levando-se em consideração a ação promovida pela topografia, bem como a delimitação das sub-bacias hidrográficas. Uma vez que o relevo age como uma barreira natural na distribuição de precipitação, as alterações das áreas de influência foram executadas usando-se como linhas delimitadoras entre polígonos, as cristas das unidades geomorfológicas que apresentam altitudes superiores a 500 m, utilizando, para tanto, as informações contidas no mapa hipsométrico. Tomando-se que uma sub-bacia hidrográfica representa uma área natural de captação de precipitação, valeu-se também das suas linhas divisórias como critério para a alteração das áreas de influência das estações onde o relevo se apresentou mais acentuado.

Do exposto, as estações que foram atingidas por estas modificações situam-se no maciço da Tijuca e nas suas imediações, região que, dentro da área piloto, apresenta maiores altitudes. O intuito de tal procedimento foi garantir que a área de influência represente de

forma mais fidedigna possível, as condições de chuvas que seriam captadas por um determinado posto. As áreas de influência modificadas referem-se às estações de Cidade de Deus, Grajaú, Itanhangá, Rocinha, Sumaré, Tijuca e Vidigal. Na Fig. 4.3 estão representadas as áreas de influência após a modificação para as estações pertencentes à área piloto.

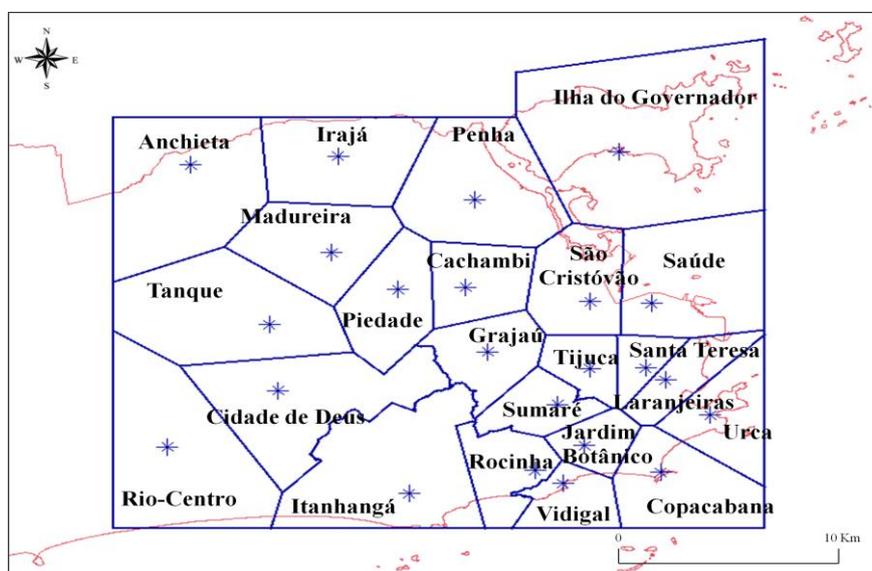


Figura 4.3 – Áreas de influência modificadas das estações para a área piloto de estudo.

Trabalhando no interior da área piloto, o passo seguinte foi associar cada evento de escorregamento que apresentava coordenadas geográficas bem definidas a uma determinada estação pluviométrica. Tal tarefa foi realizada de maneira simples com a utilização da ferramenta computacional baseada em sistemas de informações geográficas, uma vez que bastou verificar-se a qual área de influência cada acidente pertencia. O resultado da distribuição dos deslizamentos por posto pluviométrico está compilado na Tab. 4.4.

Tabela 4.4 – Distribuição de deslizamentos por estações pluviométricas na área piloto.

| Estações | Número de acidentes |
|--------------------|---------------------|
| Santa Teresa | 21 |
| Cidade de Deus | 9 |
| Tanque | 8 |
| Grajaú | 17 |
| Ilha do Governador | 8 |
| Laranjeiras | 8 |
| Copacabana | 3 |
| Urca | 2 |

| Estações | Número de acidentes |
|-----------------|---------------------|
| Madureira | 14 |
| Anchieta | 2 |
| Irajá | 4 |
| Piedade | 12 |
| Cachambi | 2 |
| Itanhangá | 1 |
| Jardim Botânico | 3 |
| Rocinha | 6 |
| Sumaré | 3 |
| Vidigal | 2 |
| Saúde | 3 |
| São Cristóvão | 6 |
| Tijuca | 5 |
| Penha | 24 |
| Total | 163 |

Observou-se, que para o grupo de 23 estações presentes na área piloto, apenas o posto pluviométrico Rio-Centro não possuiu qualquer evento de deslizamento associado a sua área de influência.

Para o conjunto de escorregamentos que possuíam os atributos temporais definidos (data e hora ou apenas data), mas que não foram passíveis de serem georreferenciados optou-se por utilizar, na determinação das áreas de influência deste tipo de ocorrência, o posto pluviométrico estabelecido no próprio inventário de escorregamentos fornecido pela Geo-Rio, cujo critério baseia-se na proximidade do acidente com o respectivo pluviômetro.

Assim, estes acidentes foram classificados pertencendo à área de influência de mesmo nome da estação proposta pela Fundação Geo-Rio em seus relatórios internos. Isto permitiu que tais registros não fossem descartados, uma vez que o fato de relacionar os escorregamentos com algum posto pluviométrico pertencente à área piloto se configurou como uma condição suficiente para a execução de análises as quais considerassem aspectos relacionados a acumulados de chuva.

A discriminação entre o número de acidentes que apresentaram atributos espaciais e temporais definidos, e os que apresentaram apenas propriedades temporais enquadrando-se na situação exposta acima, por estação, está descrita na Tab. 4.5.

Tabela 4.5 – Distinção entre eventos com data e localização definidas e eventos somente com data registrada.

| Estações | Número de acidentes | |
|--------------------|-------------------------------------|-----------------------------|
| | Com data e localização determinadas | Apenas com data determinada |
| Santa Teresa | 21 | 11 |
| Cidade de Deus | 9 | 4 |
| Tanque | 8 | 2 |
| Grajaú | 17 | 18 |
| Ilha do Governador | 8 | 15 |
| Laranjeiras | 8 | 6 |
| Copacabana | 3 | 2 |
| Urca | 2 | 4 |
| Madureira | 14 | 31 |
| Anchieta | 2 | 11 |
| Irajá | 4 | 10 |
| Piedade | 12 | 16 |
| Cachambi | 2 | 4 |
| Itanhangá | 1 | 5 |
| Jardim Botânico | 3 | 3 |
| Rocinha | 6 | 10 |
| Sumaré | 3 | 12 |
| Vidigal | 2 | 11 |
| Saúde | 3 | 6 |
| São Cristóvão | 6 | 1 |
| Tijuca | 5 | 15 |
| Penha | 24 | 37 |
| Total | 163 | 234 |

Uma vez definido o grupo de estações pluviométricas com a característica de pertencer à área piloto e possuírem algum acidente geotécnico atrelado à sua área de influência, passou-se a organizar a série com os dados de chuvas correspondentes a cada um destes pluviômetros.

As informações pluviométricas provenientes do sistema Alerta Rio encontram-se separadas por anos sob forma matricial, onde cada linha da matriz representa os dados de

chuva para um determinado dia do ano e as colunas definem o instante em que o registro foi captado, dentro daquele mesmo dia.

A configuração inicial da disposição dos dados de precipitação elaborada pela Geo-Rio foi mantida para a organização das matrizes de chuva para cada estação, salvo sob alguns aspectos. A principal mudança é que cada estação possui uma matriz que representa os dados pluviométricos para o período compreendido dos anos de 1997 a 2002, e não apenas para um só ano. Ou seja, efetuou-se a união das informações pluviométricas para estes seis anos, compilando-os em uma única tabela.

As matrizes de chuva têm as seguintes características:

- Cada matriz possui 2.192 linhas e 96 colunas;
- A primeira linha da matriz refere-se aos instantes, expressos em minutos, nos quais foram registrados os dados pluviométricos ao longo de cada dia, sendo que os registros são armazenados a cada quinze minutos;
- Cada linha, a partir da segunda, representa as informações pluviométricas de cada dia pertencente ao período de 01/01/1997 a 31/12/2002;

A razão para a junção das informações de todos os anos em apenas uma matriz pode ser explicada pelo seu caráter prático, devido à imposição de continuidade dos dados entre os anos. A adoção desta prática evitou a utilização de vários arquivos com registros de chuva para uma mesma estação, o que facilitou a manipulação destes últimos. Desta forma, qualquer dado pluviométrico presente neste período, bem como algum acumulado de chuva associado a este momento, poderia ser facilmente alcançado, bastando para isso acessar a matriz na linha correspondente ao dia e na coluna concernente ao horário.

Já a incorporação dos índices de chuvas do ano de 1997 mostrou-se necessária como forma de medida preventiva para o caso da eventual necessidade de obtenção de acumulados pluviométricos ocorridos em 1998, que necessitassem de dados do ano anterior para o seu cálculo.

Ressalta-se que o conjunto das estações pluviométricas sofreu alteração no decorrer do período de estudo com a criação de duas novas estações e a realocação de um posto, o que implicou na adequação dos dados pluviométricos nestes casos. A estação de Laranjeiras apresenta registros próprios disponíveis desde 13/08/2000, de forma que os dados anteriores a esta data, utilizados para compor a matriz de chuvas desta nova estação, foram tomados do posto mais próximo já existente que, no caso, seria a estação da Tijuca. De maneira análoga, para a nova estação de São Cristóvão que iniciou sua operação em 19/08/2000, os registros de chuva relativos ao período de 01/01/1997 a 18/08/2000 são compostos por aqueles

pertencentes à estação Saúde, obedecendo novamente o critério de maior proximidade espacial com uma estação já definida previamente. Em junho de 2001, a localização da estação São Conrado foi alterada, sendo que a mesma passou a ser denominada, a partir de então, estação Rocinha. A posição considerada desta estação, para efeito de análises, foi esta última estabelecida.

Uma vez que as matrizes de chuva encontraram-se formadas para cada uma das estações, observou-se a ausência de vários registros pluviométricos neste conjunto de dados. Portanto, buscou-se pautar critérios para a incorporação destas informações não definidas. Primeiramente, efetuou-se a substituição dos dados ausentes pelos registros definidos provenientes da estação mais próxima para o período de tempo correspondente. Na Tab. 4.6 encontram-se cada estação relacionada com o seu respectivo posto, do qual foram retirados os dados faltantes.

Tabela 4.6 – Estações e seus respectivos postos mais próximos para substituição de dados ausentes.

| Estações | Estações utilizadas na substituição |
|--------------------|-------------------------------------|
| Santa Teresa | Tijuca e Laranjeiras |
| Cidade de Deus | Tanque |
| Tanque | Cidade de Deus |
| Grajaú | Cachambi |
| Ilha do Governador | Penha |
| Laranjeiras | Santa Teresa e Tijuca |
| Copacabana | Jardim Botânico |
| Urca | Copacabana |
| Madureira | Piedade |
| Anchieta | Irajá |
| Irajá | Madureira |
| Piedade | Cachambi |
| Cachambi | Piedade |
| Itanhangá | Rocinha |
| Jardim Botânico | Vidigal |
| Rocinha | Vidigal |
| Sumaré | Tijuca |

| Estações | Estações utilizadas na substituição |
|---------------|-------------------------------------|
| Vidigal | Rocinha |
| Saúde | Santa Teresa e São Cristóvão |
| São Cristóvão | Tijuca e Saúde |
| Tijuca | Sumaré |
| Penha | Cachambi |

Nos casos em que a estação mais próxima também apresentava informações não determinadas para o período de tempo considerado, as entradas não existentes foram tomadas como nulas. É importante frisar que, para todas as estações, o período compreendido pelos treze primeiros dias do ano de 2001 não apresentaram nenhuma informação de chuva determinada, de maneira que estes dados pluviométricos também tiveram seus valores substituídos por zero.

Na organização dos escorregamentos, similarmente naquela adotada para os dados pluviométricos, contemplou-se a distinção dos registros para cada estação e sob a forma de tabelas. A concepção destas matrizes propõe que cada linha refere-se a um evento de deslizamento distinto, encontrando-se nas colunas as informações de cada ocorrência dispostas da seguinte maneira:

- A primeira coluna refere-se ao horário do evento;
- A segunda coluna relaciona-se ao dia em que o evento aconteceu;
- A terceira coluna traz o mês da ocorrência do evento;
- Na quarta coluna está o ano do registro de deslizamento;
- A quinta coluna faz menção ao número do laudo do escorregamento segundo a Geo-Rio.

Inicialmente, fez-se a distinção das matrizes de escorregamentos, considerando uma mesma estação, entre os registros com localização e data determinadas e os eventos que apresentaram somente a data definida. No entanto, a organização dispensada para ambos os casos foi a mesma e, posteriormente, os dados foram unidos. Como exemplo, a matriz de escorregamentos para a estação Saúde que possuem atributos espaciais e temporais definidos está representada pela Tab. 4.7.

Tabela 4.7 – Organização dos dados de escorregamentos com localização e data definidas para a estação Saúde.

| Hora | Data | | | Número do laudo |
|-------|------|-----|------|-----------------|
| | Dia | Mês | Ano | |
| 02:30 | 21 | 07 | 2001 | 340 |
| - | 18 | 02 | 1998 | 189 |
| - | 31 | 01 | 2000 | 148 |

A presença de três linhas com dados demonstra a existência de três registros de escorregamentos, conforme estabelecido.

Modificou-se parcialmente a estrutura inicial destas matrizes, visando à compatibilização entre os dados de escorregamentos e as informações de chuvas. Dentre as mudanças efetuadas, encontra-se a alteração do formato do horário do evento para minutos. Tal modificação foi realizada manualmente.

Além disso, a data do deslizamento, que até então era composta por três colunas, foi condensada para apenas uma, a qual, tomando como base o dia 01/01/1997, representa o número de dias decorridos a partir desta data até aquela do acontecimento do evento. Esta medida é justificável, pois a representação das datas nas matrizes de dados pluviométricos encontra-se desta forma. As colunas referentes ao ano e ao número do laudo continuaram presentes como instrumentos de distinção e identificação entre os vários registros de escorregamentos.

Para tanto, desenvolveu-se uma função específica no programa computacional MatLab, que recebesse como parâmetro de entrada as matrizes na sua configuração inicial e retornasse a tabela alterada com apenas quatro colunas. Então, a matriz anteriormente citada correspondente à estação Saúde tomaria a aparência demonstrada pela Tab. 4.8.

Tabela 4.8 – Dados de escorregamentos da estação Saúde com as alterações de horário e data.

| Horário | Data | Ano | Número do laudo |
|---------|------|------|-----------------|
| 150 | 1663 | 2001 | 340 |
| - | 414 | 1998 | 189 |
| - | 1126 | 2000 | 148 |

Houve, ainda, a necessidade de realizar uma estimativa do horário dos acidentes para vários registros que não apresentaram esta informação. Verificou-se, nestes casos, que, quando presente, a única informação disponível relatava se o deslizamento teria ocorrido

durante a madrugada ou durante a noite do dia correspondente ao qual foi registrado, sendo que, em muitas ocasiões, como naquelas mostradas na Tab. 4.8, nenhum tipo de dado referente à hora foi constatado.

O procedimento de obtenção do possível horário para as ocorrências fundamentou-se na determinação da maior precipitação registrada no intervalo de tempo para o qual o episódio poderia ter acontecido. Assim, três possibilidades foram constatadas para um acidente que não apresentasse horário definido mediante os dados disponíveis:

- Durante a madrugada (00h00min às 06h00min);
- Durante a noite (18h00min às 23h59min);
- Durante todo o dia (00h00min às 23h59min) para aqueles registros sem qualquer informação.

Criou-se uma função no MatLab que tomasse, como argumentos de entrada, os registros de escorregamentos que não possuíssem hora definida para uma determinada estação, juntamente com a sua respectiva matriz de dados pluviométricos. Foi realizada a busca sequencial do maior valor de chuva pertencente à linha da matriz de dados pluviométricos referente ao dia do deslizamento, dentro do intervalo de tempo estabelecido (madrugada, noite ou durante todo dia). Tomou-se o instante do registro desta máxima precipitação, que está explicitado no elemento da matriz de chuvas correspondente à primeira linha e cuja coluna é a mesma do maior valor de precipitação encontrado, como sendo o horário presumível da ocorrência do acidente.

Como saída, a função retornava a matriz de escorregamentos agora com a sua primeira coluna preenchida com os valores da hora calculada. A Tab. 4.9 mostra os dados de escorregamentos que possuem características espaciais e temporais definidas da estação Saúde retornados pela função após a incorporação das horas calculadas.

Tabela 4.9 – Escorregamentos relativos à estação Saúde com as horas calculadas acrescentadas.

| Horário | Data | Ano | Número do laudo |
|---------|------|------|-----------------|
| 150 | 1663 | 2001 | 340 |
| 16 | 414 | 1998 | 189 |
| 1096 | 1126 | 2000 | 148 |

Esse procedimento foi aplicado para todos os escorregamentos que constassem nessa situação para todos os postos pluviométricos, de forma que, ao fim deste processo, todos os

registros de acidentes possuíam quatro atributos que os identificavam relativos à hora, data, ano e número do laudo, e sob o formato apontado anteriormente.

Ao fim da realização dos procedimentos citados, a base de dados organizada e depurada encontrou-se pronta, permitindo o desenvolvimento das análises na etapa seguinte.

4.2 ANÁLISES DA RELAÇÃO ENTRE ACIDENTES E PRECIPITAÇÃO

Os processos das análises começaram pelo cálculo dos acumulados de chuva associados a cada evento de escorregamento, tomando-se como base os intervalos de tempo utilizados pelo sistema Alerta Rio, no estabelecimento dos seus níveis de alerta, os quais foram cedidos muito cordialmente pela Fundação Geo-Rio e que se encontram citados na Tab. 4.10.

Tabela 4.10 – Níveis de alerta para escorregamentos do sistema Alerta Rio.

| | NÍVEL MÉDIO | NÍVEL ALTO | NÍVEL MUITO ALTO |
|------------------|-------------------------------|-------------------------------|---|
| Acumulado em 1h | 10 a 30 mm | 30 a 50 mm | Maior que 50 mm |
| Acumulado em 24h | 50 a 100 mm | 100 a 175 mm | Maior que 175 mm |
| Acumulado em 96h | 100 a 175 mm e 10 a 30 mm/24h | 175 a 250 mm e 30 a 50 mm/24h | Maior que 250 mm e maior que 100 mm/24h |

A computação dos acumulados pluviométricos relacionados aos períodos de 1 hora, 24 horas e 96 horas foi realizada com o auxílio de funções desenvolvidas no MatLab, específicas para este desígnio e que apresentavam como parâmetros de entrada, as matrizes com os dados de chuva e as matrizes com os acidentes geotécnicos. Como resultado, novas matrizes foram geradas para cada estação, sendo que estas mantiveram a característica de cada linha representar um determinado evento de escorregamento e incorporando, ainda, as seguintes informações:

- A primeira coluna refere-se aos acumulados calculados de 1 hora;
- A segunda coluna refere-se aos acumulados calculados de 24 horas;
- A terceira coluna refere-se aos acumulados calculados de 96 horas;
- Na quarta coluna está relacionado o número do laudo do respectivo acidente conforme a Geo Rio;
- A quinta coluna traz o ano de ocorrência do escorregamento.

Desta forma, os elementos da coleção de escorregamentos de um dado posto pluviométrico passaram a ser representados pelos seus respectivos acumulados, passíveis de serem classificados em relação aos níveis de alerta de acidentes assumidos pelo sistema Alerta Rio, de maneira que se executou tal procedimento. No entanto, observou-se que, para os mencionados acumulados, muitos registros não se enquadravam em nenhum dos níveis estabelecidos pelo sistema, apresentando precipitação acumulada calculada menor que os limites inferiores do nível médio.

Criou-se, então, um intervalo teórico denominado nível baixo, que contemplasse as precipitações acumuladas inferiores ao nível médio para os períodos de 1 hora, 24 horas e 96 horas, permitindo a associação dos escorregamentos presentes nesta situação. Este novo nível incorporado na análise está definido como mostrado na Tab. 4.11.

Tabela 4.11 – Definição do nível baixo de ocorrência de deslizamentos.

| Precipitação acumulada | Nível Baixo |
|------------------------|--|
| 1 hora | Entre 0 mm e 10 mm |
| 24 horas | Entre 0 mm e 50 mm |
| 96 horas | Entre 0 mm e 100 mm e entre 0 mm e 10 mm/24h |

Alguns escorregamentos apresentaram acumulados de precipitação nulos associados aos intervalos de 1 hora e de 24 horas. Pelo modo que se encontra definido, o nível baixo excluiu os registros nesta situação, o que de certa forma foi benéfico, uma vez que o foco do trabalho está no estudo daqueles acidentes induzidos por precipitação. A ausência de chuvas vinculadas a estes escorregamentos sugere que estes foram de natureza circunstancial, provocados por fatores distintos de chuva.

Os resultados do agrupamento dos escorregamentos, realizados para os acumulados de 1 hora, de 24 horas e de 96 horas em relação aos níveis de alerta, estão compilados nas Tab. 4.12, Tab. 4.13 e Tab. 4.14, respectivamente.

Tabela 4.12 – Número de escorregamentos para cada estação, agrupados por níveis de alerta referentes ao acumulado pluviométrico de 1 hora.

| Estações | Nível baixo | Nível médio | Nível alto | Nível muito alto | Soma por estação |
|--------------|-------------|-------------|------------|------------------|------------------|
| Santa Teresa | 8 | 9 | 5 | 1 | 23 |

| Estações | Nível baixo | Nível médio | Nível alto | Nível muito alto | Soma por estação |
|--------------------|-------------|-------------|------------|------------------|------------------|
| Cidade de Deus | 8 | 2 | 0 | 0 | 10 |
| Tanque | 4 | 3 | 1 | 0 | 8 |
| Grajaú | 16 | 4 | 1 | 1 | 22 |
| Ilha do Governador | 9 | 3 | 2 | 0 | 14 |
| Laranjeiras | 4 | 2 | 1 | 0 | 7 |
| Copacabana | 4 | 0 | 0 | 0 | 4 |
| Urca | 4 | 1 | 0 | 0 | 5 |
| Madureira | 21 | 5 | 4 | 0 | 30 |
| Anchieta | 6 | 2 | 0 | 0 | 8 |
| Irajá | 5 | 5 | 0 | 0 | 10 |
| Piedade | 12 | 4 | 3 | 3 | 22 |
| Cachambi | 1 | 2 | 0 | 1 | 4 |
| Itanhangá | 4 | 0 | 1 | 0 | 5 |
| Jardim Botânico | 0 | 3 | 0 | 0 | 3 |
| Rocinha | 11 | 3 | 0 | 0 | 14 |
| Sumaré | 6 | 6 | 2 | 1 | 15 |
| Vidigal | 4 | 6 | 0 | 0 | 10 |
| Saúde | 6 | 1 | 0 | 0 | 7 |
| São Cristóvão | 4 | 0 | 0 | 0 | 4 |
| Tijuca | 12 | 2 | 4 | 0 | 18 |
| Penha | 24 | 24 | 1 | 0 | 49 |
| Total | 173 | 87 | 25 | 7 | 292 |

Tabela 4.13 – Número de escorregamentos para cada estação agrupados por níveis de alerta referentes ao acumulado pluviométrico de 24 horas.

| Estações | Nível baixo | Nível médio | Nível alto | Nível muito alto | Soma por estação |
|----------------|-------------|-------------|------------|------------------|------------------|
| Santa Teresa | 15 | 3 | 12 | 2 | 32 |
| Cidade de Deus | 7 | 1 | 5 | 0 | 13 |
| Tanque | 6 | 2 | 2 | 0 | 10 |
| Grajaú | 15 | 9 | 9 | 0 | 33 |

| Estações | Nível baixo | Nível médio | Nível alto | Nível muito alto | Soma por estação |
|--------------------|-------------|-------------|------------|------------------|------------------|
| Ilha do Governador | 14 | 2 | 7 | 0 | 23 |
| Laranjeiras | 7 | 1 | 5 | 1 | 14 |
| Copacabana | 0 | 3 | 2 | 0 | 5 |
| Urca | 2 | 4 | 0 | 0 | 6 |
| Madureira | 21 | 17 | 7 | 0 | 45 |
| Anchieta | 9 | 3 | 1 | 0 | 13 |
| Irajá | 7 | 2 | 5 | 0 | 14 |
| Piedade | 11 | 11 | 5 | 0 | 27 |
| Cachambi | 3 | 1 | 0 | 0 | 4 |
| Itanhangá | 2 | 2 | 2 | 0 | 6 |
| Jardim Botânico | 2 | 1 | 2 | 0 | 5 |
| Rocinha | 3 | 11 | 2 | 0 | 16 |
| Sumaré | 1 | 3 | 4 | 7 | 15 |
| Vidigal | 0 | 12 | 0 | 0 | 12 |
| Saúde | 5 | 2 | 1 | 0 | 8 |
| São Cristóvão | 4 | 2 | 0 | 0 | 6 |
| Tijuca | 4 | 10 | 5 | 1 | 20 |
| Penha | 29 | 22 | 10 | 0 | 61 |
| Total | 167 | 124 | 86 | 11 | 388 |

Tabela 4.14 – Número de escorregamentos para cada estação, agrupados por níveis de alerta referentes ao acumulado pluviométrico de 96 horas.

| Estações | Nível baixo | Nível médio | Nível alto | Nível muito alto | Soma por estação |
|--------------------|-------------|-------------|------------|------------------|------------------|
| Santa Teresa | 1 | 4 | 1 | 0 | 6 |
| Cidade de Deus | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Tanque | 1 | 1 | 0 | 0 | 2 |
| Grajaú | 3 | 1 | 0 | 0 | 4 |
| Ilha do Governador | 5 | 1 | 0 | 0 | 6 |
| Laranjeiras | 6 | 0 | 0 | 0 | 6 |

| Estações | Nível baixo | Nível médio | Nível alto | Nível muito alto | Soma por estação |
|-----------------|-------------|-------------|------------|------------------|------------------|
| Copacabana | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| Urca | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| Madureira | 6 | 0 | 0 | 0 | 6 |
| Anchieta | 2 | 0 | 0 | 0 | 2 |
| Irajá | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| Piedade | 2 | 0 | 0 | 0 | 2 |
| Cachambi | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Itanhangá | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| Jardim Botânico | 2 | 0 | 0 | 0 | 2 |
| Rocinha | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 |
| Sumaré | 0 | 0 | 0 | 8 | 8 |
| Vidigal | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| Saúde | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| São Cristóvão | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Tijuca | 1 | 1 | 0 | 1 | 3 |
| Penha | 4 | 0 | 0 | 0 | 4 |
| Total | 38 | 9 | 1 | 9 | 57 |

Atenta-se que nos resultados apresentados nas tabelas anteriores, já se encontra efetuada a exclusão dos acidentes que mostraram acumulados pluviométricos nulos. Ao analisar os resultados para o nível de 96 horas, verificou-se que a maioria dos deslizamentos não foi prevista pelos critérios estabelecidos no sistema de alerta. Assim sendo, por se tratar de um critério conjugado, inúmeras possibilidades de acumulados de 96 horas que melhor representassem a distribuição dos deslizamentos mostraram-se possíveis, de maneira que a adoção de um novo intervalo de precipitação representaria o abandono da proposta inicial, a qual se caracterizaria pelo uso dos limiares estipulados no sistema Alerta Rio. Em virtude do exposto, a abordagem para este acumulado pluviométrico não seguiu em desenvolvimento.

Averiguou-se que algumas estações pluviométricas possuíam individualmente um número baixo de ocorrências de deslizamentos vinculadas às suas áreas de influência. Com a intenção de tornar estas informações mais robustas, do ponto de vista quantitativo, procedeu-

se o agrupamento dos dados de postos adjacentes que se encontravam sob esta condição, o que resultou em uma nova configuração expressa pela Tab. 4.15.

Tabela 4.15 – Configuração das estações pluviométrica após a união dos dados de escorregamentos.

| Conjuntos de estações | Número de Acidentes | |
|--|---------------------|----------|
| | 1 hora | 24 horas |
| Santa Teresa | 23 | 32 |
| Penha | 49 | 61 |
| Cidade de Deus/ Tanque | 18 | 23 |
| Grajaú | 22 | 33 |
| Ilha do Governador | 14 | 23 |
| Laranjeiras/ Urca/ Copacabana | 16 | 25 |
| Madureira/ Anchieta/ Irajá | 48 | 72 |
| Piedade/ Cachambi | 26 | 31 |
| Itanhangá/ Jardim Botânico/ Rocinha/ Sumaré/ Vidigal | 47 | 54 |
| Saúde/ São Cristóvão/ Tijuca | 29 | 34 |
| Total | 292 | 388 |

Com essa medida, simplificou-se o desenvolvimento das análises, já que se passou a considerar o conjunto formado pelas estações agrupadas, em vez do estudo considerando cada posto isoladamente.

Na tentativa de impetrar mais representatividade ao rol dos acidentes geotécnicos, procurou-se extrapolar o número de escorregamentos da área piloto, de forma que estes alcançassem o mesmo montante de 1.079 acidentes associados a todo o município, mas mantendo ainda o mesmo padrão de distribuição averiguado por estações nos dados reais. O

procedimento acatado, em se tratando do acumulado de 1 hora, consistiu nos subsequentes passos:

- Estabelecimento da porcentagem representativa do número de acidentes para cada grupo de estações frente a todos os escorregamentos ocorridos na área piloto;
- Obtenção do valor teórico de escorregamentos para cada conjunto de estações através da multiplicação da porcentagem encontrada no item anterior pelo número total de acidentes ocorridos no município;
- Para cada agrupamento, calculou-se a razão entre a quantidade de acidentes reais atrelados ao acumulado pluviométrico de 1 hora e o número real de escorregamentos vinculado ao grupo de estações;
- Multiplicando-se a razão obtida no terceiro item pelos respectivos números teóricos de acidentes encontrados para cada conjunto de estações, chegou-se à quantidade teórica de deslizamentos relativos ao acumulado de 1 hora para cada um dos grupos;
- Dividindo-se o número de acidentes iniciais de cada classe de alerta (baixo, médio, alto e muito alto) pela quantidade de escorregamentos iniciais vinculados ao acumulado de 1 hora e, multiplicando-se estas razões pelo valor teórico dos deslizamentos computados no item anterior, estabeleceu-se a distribuição do quantitativo teórico de acidentes por níveis de alerta para cada um dos postos pluviométricos.

De maneira semelhante à apresentada, determinaram-se o quantitativo teórico de deslizamentos para o acumulado de 24 horas. As novas distribuições dos dados de escorregamentos para os acumulados de 1 hora e 24 horas, agora com um caráter teórico, estão explicitadas nas Tab. 4.16 e Tab. 4.17, respectivamente.

Tabela 4.16 – Distribuição de escorregamentos teóricos em relação ao acumulado de 1 hora.

| Conjuntos de estações | Número teórico de acidentes por nível de alerta | | | |
|---------------------------|---|-------------|------------|------------------|
| | Nível baixo | Nível médio | Nível alto | Nível muito alto |
| Santa Teresa | 22 | 24 | 14 | 3 |
| Penha | 65 | 65 | 2 | 1 |
| Cidade de Deus/ Tanque | 31 | 14 | 3 | 1 |
| Grajaú | 43 | 11 | 3 | 3 |

| Conjuntos de estações | Número teórico de acidentes por nível de alerta | | | |
|--|---|-------------|------------|------------------|
| | Nível baixo | Nível médio | Nível alto | Nível muito alto |
| Ilha do Governador | 24 | 8 | 5 | 1 |
| Laranjeiras/ Urca/ Copacabana | 32 | 8 | 3 | 1 |
| Madureira/ Anchieta/ Irajá | 87 | 33 | 10 | 1 |
| Piedade/ Cachambi | 35 | 16 | 8 | 11 |
| Itanhangá/ Jardim Botânico/ Rocinha/ Sumaré/ Vidigal | 68 | 49 | 8 | 3 |
| Saúde/ São Cristóvão/ Tijuca | 59 | 8 | 11 | 1 |

Tabela 4.17 – Distribuição de escorregamentos teóricos em relação ao acumulado de 24 horas.

| Conjuntos de estações | Número teórico de acidentes por nível de alerta | | | |
|---------------------------|---|-------------|------------|------------------|
| | Nível baixo | Nível médio | Nível alto | Nível muito alto |
| Santa Teresa | 41 | 8 | 33 | 5 |
| Penha | 79 | 59 | 27 | 1 |
| Cidade de Deus/ Tanque | 35 | 8 | 19 | 1 |
| Grajaú | 41 | 24 | 24 | 1 |

| Conjuntos de estações | Número teórico de acidentes por nível de alerta | | | |
|--|---|-------------|------------|------------------|
| | Nível baixo | Nível médio | Nível alto | Nível muito alto |
| Ilha do Governador | 38 | 5 | 19 | 1 |
| Laranjeiras/ Urca/ Copacabana | 24 | 22 | 19 | 3 |
| Madureira/ Anchieta/ Irajá | 100 | 60 | 35 | 1 |
| Piedade/ Cachambi | 38 | 32 | 13 | 1 |
| Itanhangá/ Jardim Botânico/ Rocinha/ Sumaré/ Vidigal | 22 | 79 | 27 | 19 |
| Saúde/ São Cristóvão/ Tijuca | 35 | 38 | 16 | 3 |

Por outro lado, queria-se investigar a incidência dos casos nos quais os acumulados de precipitação satisfizeram algum dos níveis estabelecidos pelo sistema de alerta, mas que não resultaram, de fato, em deslizamentos. A estes episódios denominaram-se Falsos Positivos e sua obtenção incidiu primeiramente no cálculo de todos os acumulados de chuva para 1 hora e 24 horas no período de 01/01/1998 a 31/12/2002, com o auxílio das mesmas funções desenvolvidas no MatLab utilizadas para a computação dos acumulados de chuva relativos aos acidentes presentes no inventário de escorregamentos.

Para cada um dos 1.826 dias do período compreendido acima, foram calculados os acumulados pluviométricos de 1 hora e 24 horas para cada hora do dia, totalizando 43.824 índices de chuva por estação, em relação a cada intervalo de tempo (1 hora e 24 horas). Logo após isto, instaurou-se a triagem dos resultados, separando os acumulados encontrados por

nível de alerta. Ao final, se alcançou a separação dos falsos positivos por nível de alerta para cada um dos postos estudados, podendo-se, ainda, mensurar as suas quantidades em cada um destes níveis.

Uma vez de posse destas informações, foi possível estabelecer a probabilidade de ruptura referente a cada um dos níveis de alerta. Isto se processou de forma relativamente simples pelo cálculo da razão entre o número de escorregamentos teóricos e o número total de acumulados, ambos associados ao mesmo nível de alerta, sendo que este total de acumulados é representado pela soma do número de falsos positivos e de escorregamentos teóricos. Este procedimento foi adotado para cada um dos grupos de estações, e tanto para o acumulado de 1 hora quanto para o de 24 horas. O número de falsos positivos considerado para efeito de cálculo de um determinado conjunto formado por duas ou mais estações, foi a média aritmética dos valores encontrados para cada posto individualmente.

As Tab. 4.18 e Tab. 4.19 exemplificam os resultados obtidos para o conjunto formado pelas estações Cidade de Deus e Tanque, atrelados aos acumulados de precipitação horários e diários, respectivamente.

Tabela 4.18 – Resultados das probabilidades de ruptura em relação aos níveis de alerta para o conjunto formado pelas estações Cidade de Deus e Tanque, relativos à chuva acumulada horária.

| Dados | Nível de alerta | | | |
|--------------------------|-----------------|-------|------|------------|
| | Baixo | Médio | Alto | Muito alto |
| Escorregamentos | 31 | 14 | 3 | 1 |
| Falsos Positivos | 2711 | 65 | 5 | 1 |
| Acumulados totais | 2742 | 79 | 8 | 2 |
| Probabilidade de ruptura | 0,01 | 0,18 | 0,38 | 0,5 |

Tabela 4.19 – Resultados das probabilidades de ruptura em relação aos níveis de alerta para o conjunto formado pelas estações Cidade de Deus e Tanque, relativos à chuva acumulada diária.

| Dados | Nível de alerta | | | |
|--------------------------|-----------------|-------|-------|------------|
| | Baixo | Médio | Alto | Muito alto |
| Escorregamentos | 35 | 8 | 19 | 1 |
| Falsos Positivos | 13473,5 | 221,5 | 41 | 0 |
| Acumulados totais | 13508,5 | 229,5 | 60 | 1 |
| Probabilidade de ruptura | 0,003 | 0,035 | 0,317 | 1 |

Como a probabilidade de ruptura está vinculada a um intervalo de chuva acumulada, houve a necessidade de se instituir um valor determinado de precipitação para cada nível de alerta, com o intuito de definir os pontos do espaço chuva acumulada contra probabilidade de ruptura, referentes a cada conjunto de postos pluviométricos. Dessa forma, o valor adotado para a chuva acumulada em cada nível de alerta consistiu no ponto médio dos próprios intervalos definidos pelos níveis de alerta.

Em relação ao nível muito alto, no qual está designado apenas o seu limite inferior, instituiu-se o máximo registro de chuva acumulada, tanto para 1 hora, quanto para 24 horas, como sendo o limite superior deste intervalo. Nas Tab. 4.20 e Tab. 4.21, encontram-se as coordenadas dos pontos em cada nível de alerta, onde pa representa o ponto médio da precipitação acumulada em mm e pr seria a probabilidade de ruptura, para cada conjunto de postos pluviométricos referentes aos acumulados de 1 hora e de 24 horas, respectivamente.

Tabela 4.20 – Pontos com coordenadas representando precipitação acumulada média em mm (pa) e probabilidade de ruptura (pr) para cada nível de alerta referente ao acumulado de chuvas horário.

| Conjuntos de estações | Nível baixo | | Nível médio | | Nível alto | | Nível muito alto | |
|-------------------------------------|-------------|------|-------------|------|------------|------|------------------|------|
| | pa (mm) | pr | pa (mm) | pr | pa (mm) | p | pa (mm) | pr |
| Santa Teresa | 5 | 0,01 | 20 | 0,21 | 40 | 0,61 | 57 | 0,75 |
| Penha | 5 | 0,03 | 20 | 0,48 | 40 | 0,29 | 57 | 0,5 |
| Cidade de Deus/ Tanque | 5 | 0,01 | 20 | 0,18 | 40 | 0,38 | 57 | 0,5 |
| Grajaú | 5 | 0,01 | 20 | 0,11 | 40 | 0,3 | 57 | 0,43 |
| Ilha do Governador | 5 | 0,01 | 20 | 0,09 | 40 | 0,33 | 57 | 0,33 |
| Laranjeiras/ Urca/ Copacabana | 5 | 0,01 | 20 | 0,09 | 40 | 0,26 | 57 | 0,6 |
| Madureira/ Anchieta/ Irajá | 5 | 0,03 | 20 | 0,3 | 40 | 0,59 | 57 | 0,75 |

| Conjuntos de estações | Nível baixo | | Nível médio | | Nível alto | | Nível muito alto | |
|--|-------------|------|-------------|------|------------|------|------------------|------|
| | pa (mm) | pr | pa (mm) | pr | pa (mm) | p | pa (mm) | pr |
| Piedade/ Cachambi | 5 | 0,01 | 20 | 0,17 | 40 | 0,47 | 57 | 0,88 |
| Itanhangá/ Jardim Botânico/ Rocinha/ Sumaré/ Vidigal | 5 | 0,02 | 20 | 0,29 | 40 | 0,4 | 57 | 0,58 |
| Saúde/ São Cristóvão/ Tijuca | 5 | 0,02 | 20 | 0,07 | 40 | 0,54 | 57 | 0,43 |

Tabela 4.21 – Pontos com coordenadas representando precipitação acumulada média em mm (pa) e probabilidade de ruptura (pr) para cada nível de alerta referente ao acumulado de chuvas diário.

| Conjuntos de estações | Nível baixo | | Nível médio | | Nível alto | | Nível muito alto | |
|---------------------------|-------------|------|-------------|------|------------|------|------------------|------|
| | pa (mm) | pr | pa (mm) | pr | pa (mm) | pr | pa (mm) | pr |
| Santa Teresa | 25 | 0,01 | 75 | 0,02 | 137,5 | 0,42 | 187,5 | 0,13 |
| Penha | 25 | 0,01 | 75 | 0,2 | 137,5 | 0,56 | 187,5 | 1 |
| Cidade de Deus/ Tanque | 25 | 0,01 | 75 | 0,03 | 137,5 | 0,32 | 187,5 | 1 |
| Grajaú | 25 | 0,01 | 75 | 0,07 | 137,5 | 0,33 | 187,5 | 0,03 |

| Conjuntos de estações | Nível baixo | | Nível médio | | Nível alto | | Nível muito alto | |
|--|-------------|------|-------------|------|------------|------|------------------|------|
| | pa (mm) | pr | pa (mm) | pr | pa (mm) | pr | pa (mm) | pr |
| Ilha do Governador | 25 | 0,01 | 75 | 0,02 | 137,5 | 0,19 | 187,5 | 1 |
| Laranjeiras/ Urca/ Copacabana | 25 | 0,01 | 75 | 0,07 | 137,5 | 0,27 | 187,5 | 0,23 |
| Madureira/ Anchieta/ Irajá | 25 | 0,01 | 75 | 0,26 | 137,5 | 0,5 | 187,5 | 1 |
| Piedade/ Cachambi | 25 | 0,01 | 75 | 0,11 | 137,5 | 0,21 | 187,5 | 1 |
| Itanhangá/ Jardim Botânico/ Rocinha/ Sumaré/ Vidigal | 25 | 0,01 | 75 | 0,11 | 137,5 | 0,18 | 187,5 | 0,4 |
| Saúde/ São Cristóvão/ Tijuca | 25 | 0,01 | 75 | 0,1 | 137,5 | 0,16 | 187,5 | 0,12 |

Utilizando a ferramenta cftool do software MatLab, ajustou-se cada curva tomando os dados mostrados acima, de maneira que as abscissas corresponderiam à precipitação acumulada e as ordenadas seriam representadas pela probabilidade de ruptura. Neste processo, o tipo de ajuste gráfico empregado, o qual resultou nas curvas de probabilidade de ruptura, referiu-se a curva gaussiana, e os resultados conseguidos encontram-se mostrados e discutidos no capítulo seguinte, referente aos resultados.

4.3 ANÁLISE DOS ATRIBUTOS ESPACIAIS

A última fase da pesquisa buscou analisar a diversidade espacial das características pertencentes à área de estudo, incorporando-as no entendimento dos fenômenos e tentando verificar qual seu papel para a ocorrência dos acidentes. Para tanto, lançou-se mão do uso da ferramenta representada pelo sistema de informação geográfica e da utilização de um método quantitativo de simplificação da quantidade de variáveis, denominado análise de componentes principais.

Inicialmente, verificaram-se quais das classes referentes às características da área piloto (geológico-geotécnico, declividade, hipsometria e uso do solo) apresentaram-se vinculadas a algum acidente que foi localizado espacialmente. Como resultado, obteve-se 22 unidades distintas nestas condições e que se encontram relacionadas a seguir:

- Formações quaternárias referentes a depósitos aluvionares, marinhos e eólicos;
- Formações terciárias de encosta;
- Solo residual de encosta com espessura maior que 2 m;
- Solo residual de encosta com espessura inferior a 2 m;
- Afloramento rochoso fraturado;
- Afloramento rochoso pedreira;
- Floresta;
- Floresta alterada;
- Campo antrópico;
- Área urbana não consolidada;
- Solo exposto;
- Área urbana;
- Altitude variando de 0 m a 100 m;
- Altitude variando de 101 m a 200 m;
- Altitude variando de 201 m a 300 m;
- Declividade variando de 0° a 2°;
- Declividade variando de 2° a 5°;
- Declividade variando de 5° a 10°;
- Declividade variando de 10° a 20°;
- Declividade variando de 20° a 30°;
- Declividade variando de 30° a 50°;

- Declividades maiores que 50°.

Com o auxílio da ferramenta denominada tabulação cruzada presente no programa SPRING, efetuou-se a intersecção do plano de informação referente às áreas de influência das estações com os demais planos onde se encontravam presentes os dados acima, resultando na determinação da forma como cada área de influência está composta em relação às unidades previamente citadas. Procedeu-se, então, a soma destas componentes, mediante o agrupamento das estações pluviométricas adjacentes em dez conjuntos, e que foi estabelecido neste capítulo.

A consequência disso foi que cada um dos grupos de postos pluviométricos ficou representado pelas unidades que ocorreram algum tipo de escorregamento, resultando em uma matriz de dez linhas (referentes aos conjuntos de estações) por 22 colunas (referentes às classes onde se sucederam algum acidente).

Esta matriz funcionou como dado de entrada para a análise de componentes principais, realizada no programa MatLab, por meio do comando princomp. A aplicação desta técnica permite a geração de um novo conjunto de variáveis ortogonais entre si, as quais são combinações lineares das classes de entrada originais. Isto possibilita uma melhor visualização das informações, proporcionando a análise das unidades mais relevantes que atuam no processo.

5 RESULTADOS

Pretende-se, neste capítulo, apresentar e discutir os principais resultados alcançados pela presente pesquisa, de maneira a permitir a sua interpretação e a incorporação de inferências plausíveis acerca dos dados obtidos.

5.1 DISTRIBUIÇÃO DOS MOVIMENTOS DE MASSA

Com base nas informações colhidas e extraídas na etapa de metodologia, promoveu-se a análise dos principais aspectos vinculados aos deslizamentos no interior da região de estudo.

A distribuição das ocorrências dos acidentes reais nas diversas estações da área piloto, levando-se em consideração tanto os deslizamentos determinados espacialmente e temporalmente, como aqueles apenas com data determinada, mas atrelados a algum posto pluviométrico, é mostrada na Fig. 5.1.

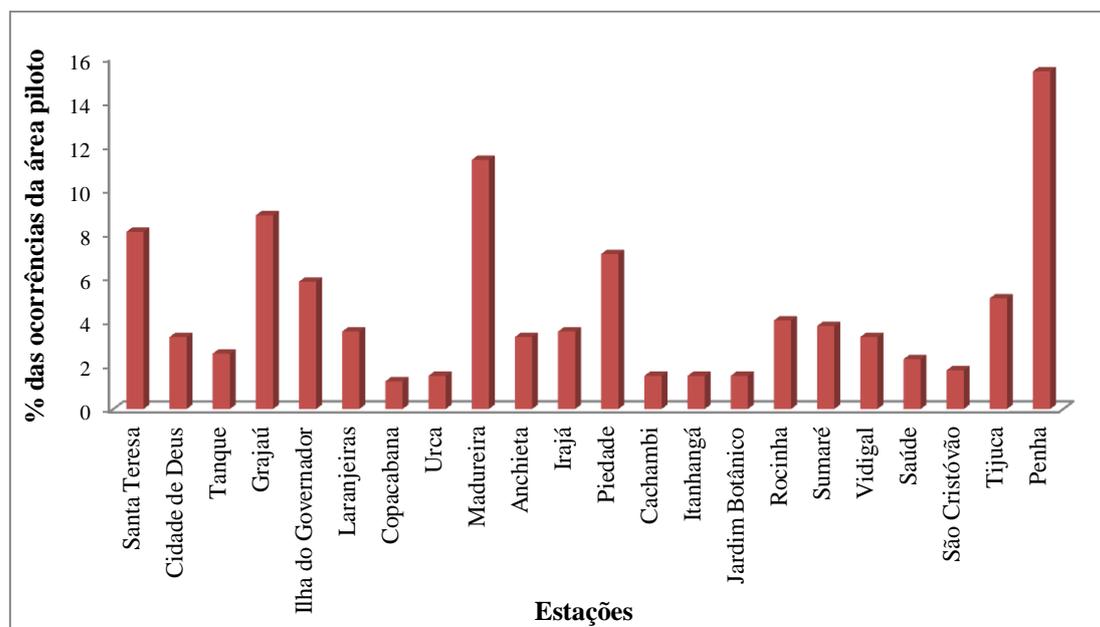


Figura 5.1 – Distribuição de deslizamentos reais por estações pluviométricas pertencentes à área piloto.

Apesar de o relevo irregular com altas cotas propiciar uma repartição dos escorregamentos por quase toda área piloto, esta distribuição não se apresenta de forma regular, concentrando-se em determinadas regiões.

Destaca-se uma concentração de deslizamentos considerável vinculada à estação de Santa Teresa, composta por 8% dos casos e que, assim como o posto da Tijuca, situa-se em áreas próximas ao maciço da Tijuca, na porção central da cidade. Amaral (1997) estabelece que a existência de favelas, principalmente no flanco norte do maciço, é uma das principais causas desta incidência de escorregamentos.

Já na porção norte do município, observa-se que a maior frequência de deslizamentos está associada às áreas de influência das estações da Penha, Madureira, Piedade e Grajaú, as quais, juntas, totalizam 42,5% de todos os eventos registrados. A explicação para isto, tal como foi mencionado anteriormente, deve-se ao fato da existência de uma grande concentração de favelas nesta região, as quais se instalaram de maneira desordenada, ainda que estas localidades não representem as maiores elevações do município, nem possuam declividades acentuadas, conforme já notado por Amaral (1997).

Outro ponto na distribuição das ocorrências, que vai de encontro àquilo ressaltado pelo autor, é o crescimento da frequência dos escorregamentos no extremo norte da cidade, principalmente com relação à Ilha do Governador. Há também registros relacionados aos morros da zona sul da cidade.

Na Fig 5.2 apresenta-se a distribuição pelas diversas estações pluviométricas, somente dos escorregamentos que tiveram sua localização bem determinada.

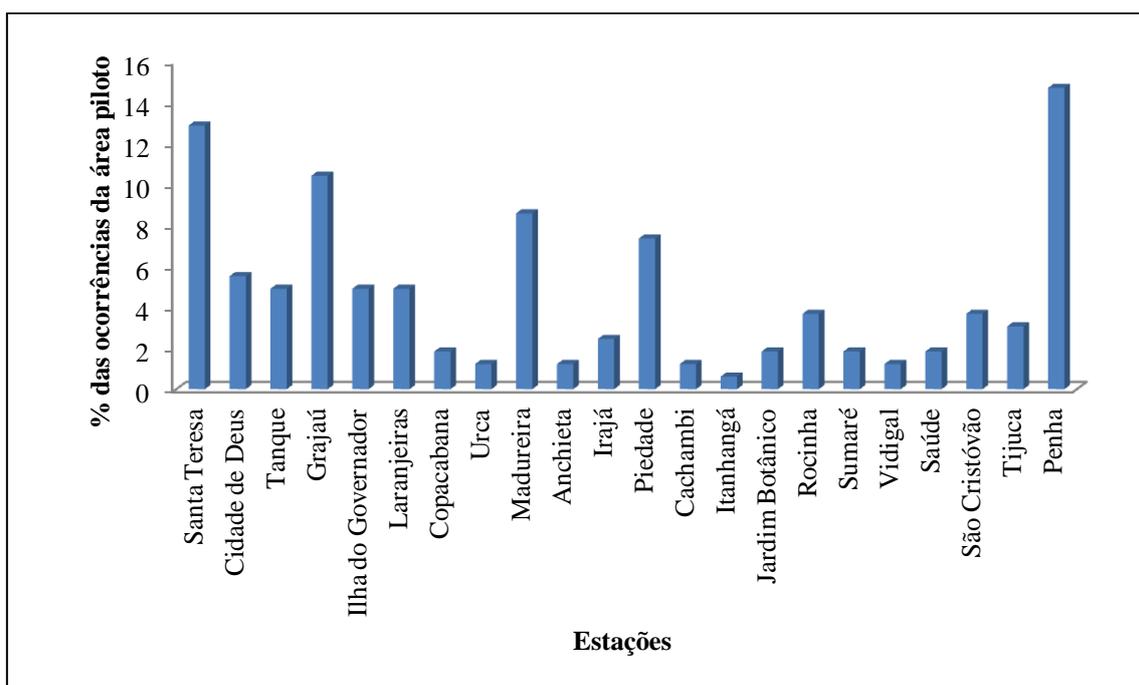


Figura 5.2 – Distribuição em relação aos postos pluviométricos dos acidentes com localização e dados temporais precisos pertencentes à área piloto.

Confrontando-se os dois gráficos anteriores, conclui-se que, apesar das frequências diferirem de uma distribuição para outra, em relação a uma mesma estação, o padrão entre elas mostrou-se similar, coincidindo-se, ainda, em ambas as distribuições, os mesmos postos com maiores números de acidentes (Santa Teresa, Grajaú, Madureira, Piedade e Penha). Pode-se inferir, então, que a amostra composta apenas pelos registros que tiveram sua

localização estabelecida possui representatividade do universo dos dados, pelo menos no que tange a distribuição espacial entre estações.

Dessa forma, por meio dos dados de deslizamentos que se mostraram passíveis de serem localizados espacialmente e, utilizando-se as informações contidas na base cartográfica do trabalho, tentou-se investigar quais aspectos geográficos e geológicos imputam uma maior incidência de acidentes. Esta medida permite uma visão preliminar das características daquelas áreas que teriam uma maior propensão a serem instáveis.

A Fig. 5.3 expressa a distribuição dos deslizamentos em função das diferentes classes geológico-geotécnicas utilizadas na pesquisa.

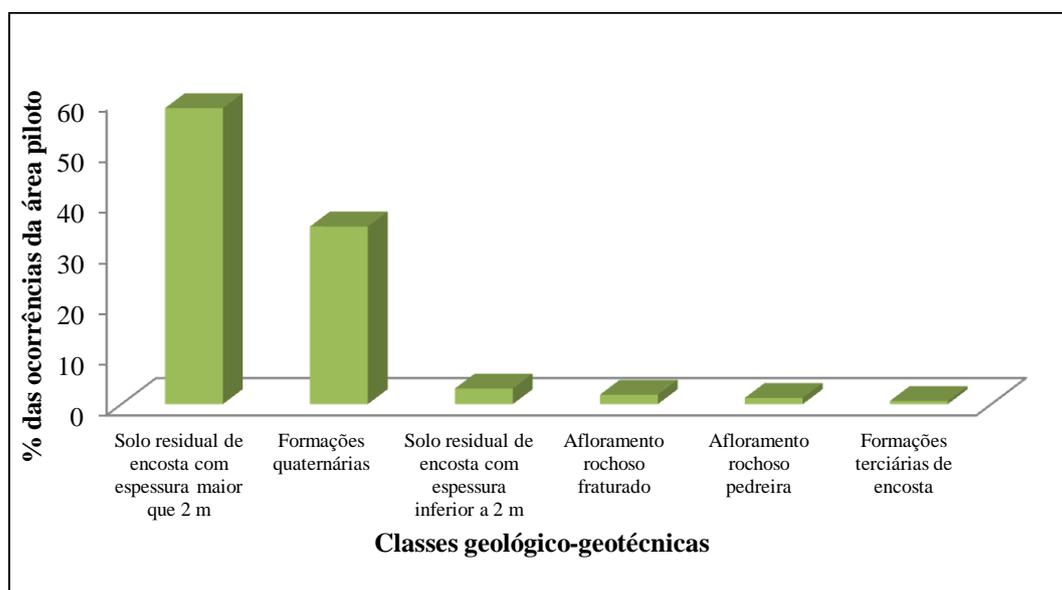


Figura 5.3 – Distribuição dos acidentes em relação às unidades geológico-geotécnicas.

A predominância dos escorregamentos encontra-se concentrada na classe formada por solos residuais de encosta que possuem espessura maior que 2 m. Este resultado é ratificado pelas conclusões estabelecidas nos relatórios anuais confeccionados pela Fundação Geo-Rio, onde a tipologia associada a escorregamento de solos em taludes de corte configurou-se como a ocorrência mais comum no período de estudo.

No entanto, a alta taxa de acidentes relacionada às formações quaternárias, as quais se referem a depósitos aluvionares, marinhos e eólicos, não se encontra condizente com os dados disponíveis na literatura especializada. Em sua tese de doutorado, Amaral (1997) ressalta que a presença de escorregamentos associados a sedimentos quaternários no município do Rio de Janeiro estaria ligada a problemas na digitalização dos mapas e, em algumas ocasiões, a ocorrência de acidentes no pé da encosta, justamente na transição entre solos residuais/depósitos para os aluviões.

No presente trabalho, a possível explicação para tal discordância, com o consequente exagero do número de acidentes dessa classe geológico-geotécnica, repousa sobre a forma em que foram determinadas as coordenadas dos acidentes. Em se tratando de um ambiente complexo, do ponto de vista geológico, com uma grande variabilidade espacial, a falta de acurácia na localização dos pontos levará a resultados destoantes da realidade em maior ou menor grau.

Uma vez que, pela impossibilidade de execução de trabalhos de campo para a sua determinação precisa, as coordenadas dos escorregamentos foram conseguidas de maneira aproximada, por meio do software Google Earth, de forma que o posicionamento obtido não ofereceu, neste caso, uma resposta adequada, conforme exemplificado na Fig. 5.4. Nesta figura, pode-se observar que aqueles escorregamentos que se encontram associados à classe quaternária (na cor amarela) estão sempre próximos aos limites entre unidades geológico-geotécnicas distintas, como é mostrado no detalhe da figura indicada. Isto leva a crer que, na realidade, a maioria destes acidentes estaria ligada a uma classe diferente da relativa a sedimentos quaternários, sendo que, conseqüentemente, a distribuição tomaria um novo perfil. Entretanto, em grande parte da área de estudo, o contato entre a unidade quaternária se estabelece com a classe de solo residual de encosta, que apresenta espessura maior que 2 m (na cor azul), de forma que a frequência desta última cresceria significativamente, continuando, portanto, a destacar-se na distribuição.

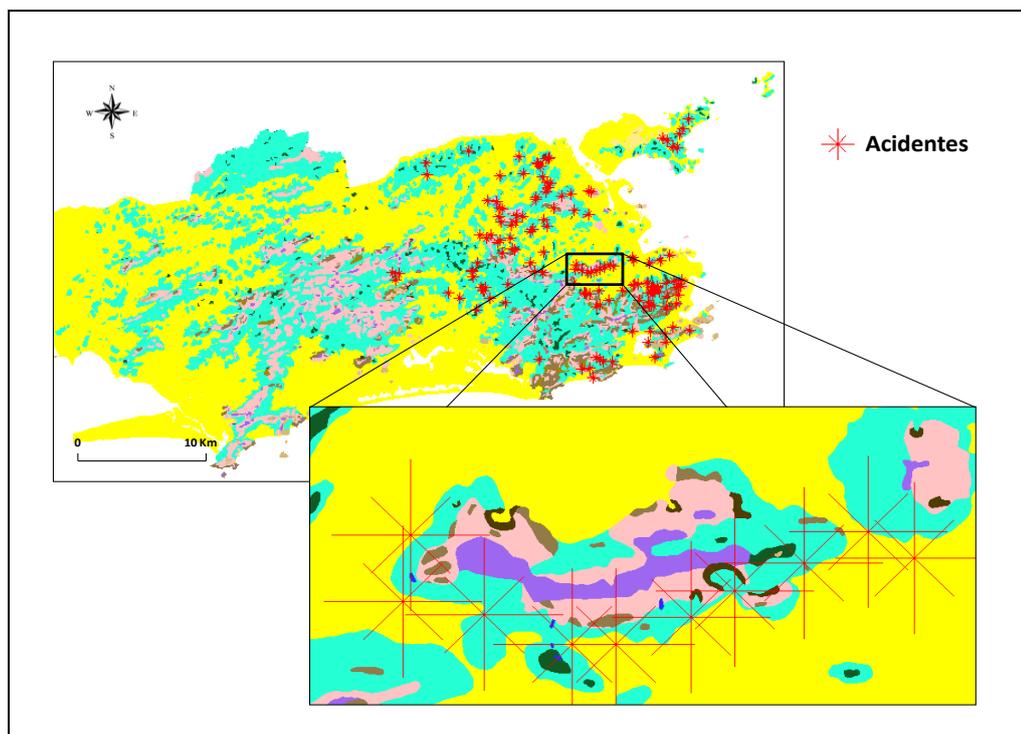


Figura 5.4 – Detalhe do posicionamento de alguns acidentes vinculados à classe quaternária.

Haveria ainda a possibilidade de que uma parcela desta frequência de deslizamentos atribuída aos sedimentos quaternários pertencesse a classes que, até então, estiveram ausentes nesta distribuição, mas que, na realidade, possuíam alguma representatividade na determinação dos acidentes. Exemplo disto seriam as classes de solo residual de topo com espessura maior que 2 m (em verde escuro) e vazadouros de lixo (em azul).

Em relação ao uso do solo, a distribuição dos acidentes na área piloto encontra-se mostrada na Fig. 5.5. Observa-se uma notória concentração dos escorregamentos nas áreas urbanas, as quais apresentam 85,3% do total de registros. O caráter induzido dos deslizamentos fica ressaltado pelos resultados, evidenciando que a prática de ocupação desordenada das encostas mediante construções inadequadas, execução de cortes inapropriados, deposição de lixo e disposição de águas servidas têm relação direta com o desencadeamento de acidentes geotécnicos (Amaral, 1997).

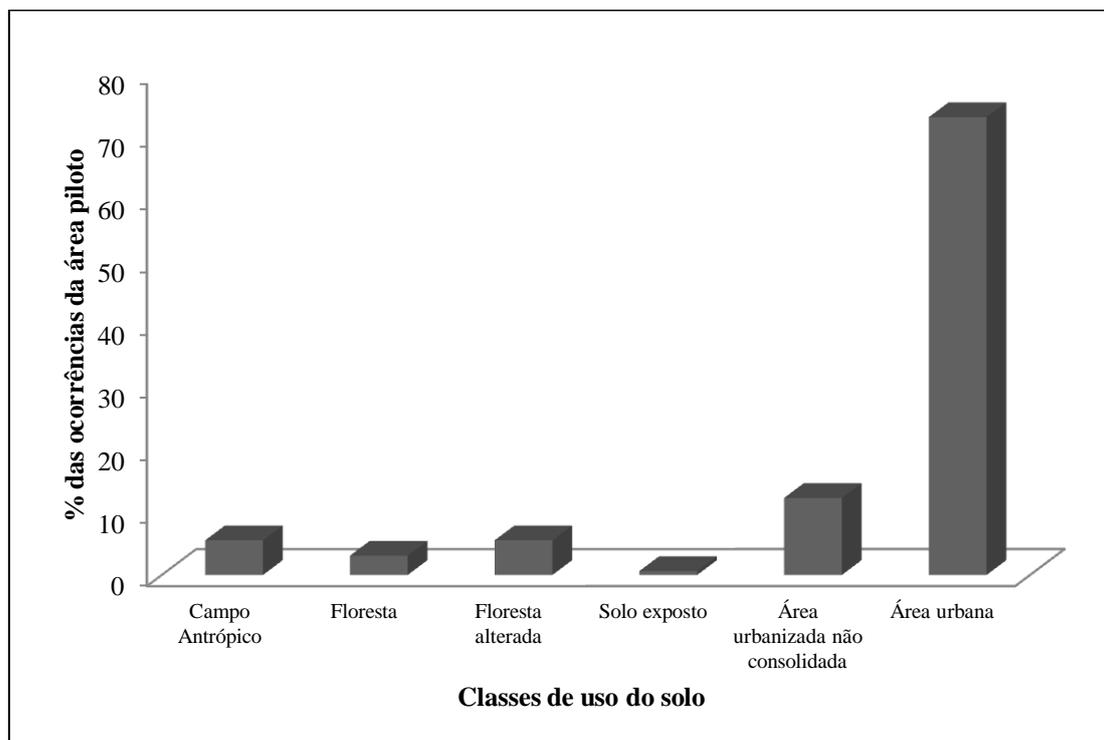


Figura 5.5 – Distribuição dos acidentes em relação ao uso do solo.

Em relação aos aspectos de declividade e hipsometria, também se observou, nos resultados, incoerências as quais se acredita que aconteceram em decorrência do posicionamento conferido aos deslizamentos, conforme já comentado. A distribuição das ocorrências pelas diversas classes de declividade apresentou uma concentração exacerbada no intervalo que compreende os valores que variam de 0° a 2°, conforme mostrado na Fig. 5.6. Mais da metade das ocorrências que se encontram nesta situação estão associadas, quando

tratadas em termos geológico-geotécnicos, à classe quaternária, o que permite coligar que tais pontos são aqueles mesmos que não foram localizados espacialmente de forma aceitável.

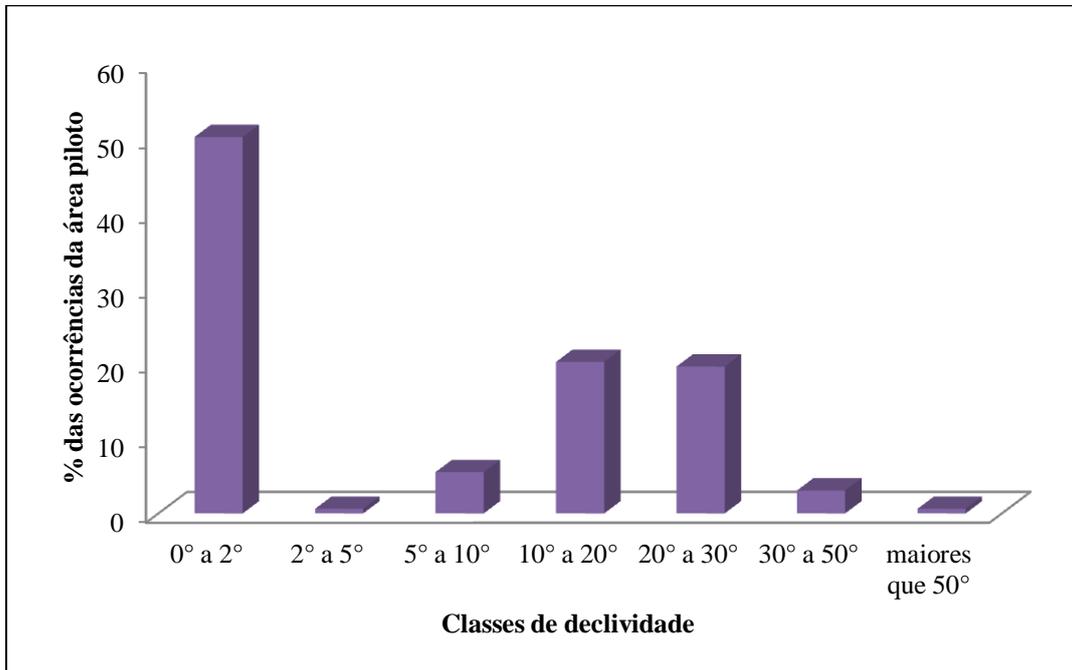


Figura 5.6– Distribuição dos acidentes em relação às classes de declividade.

Outra hipótese levantada para a presença destas divergências seria o grau de representatividade dos dados das amostras utilizadas na elaboração do modelo numérico do terreno, já que uma subamostragem em áreas onde o relevo se apresenta mais movimentado implicaria na falta de informações importantes para a confecção de um mapa de declividade realístico.

Excetuando-se esta primeira classe, observa-se que a maior quantidade de deslizamentos associa-se a declividades consideradas entre baixas e médias, variando de 10° a 30°. Reimer (2006), ao analisar a susceptibilidade de escorregamentos rasos em solos na região de Petrópolis, destacou uma concentração considerável de ocorrências neste mesmo intervalo, conjecturando que isto estaria ligado à ação antrópica, com a execução de cortes que não contemplavam os requisitos técnicos mínimos permitindo, desta forma, um estado instável a terrenos que não se configuravam tão críticos do ponto de vista da estabilidade.

A classe de hipsometria que varia de 0 m a 100 m destacou-se de forma proeminente em relação às outras, pelo fato dos escorregamentos terem sido representados no pé das encostas, locais cuja altitude é baixa. A distribuição relacionada à hipsometria está retratada na Fig. 5.7.

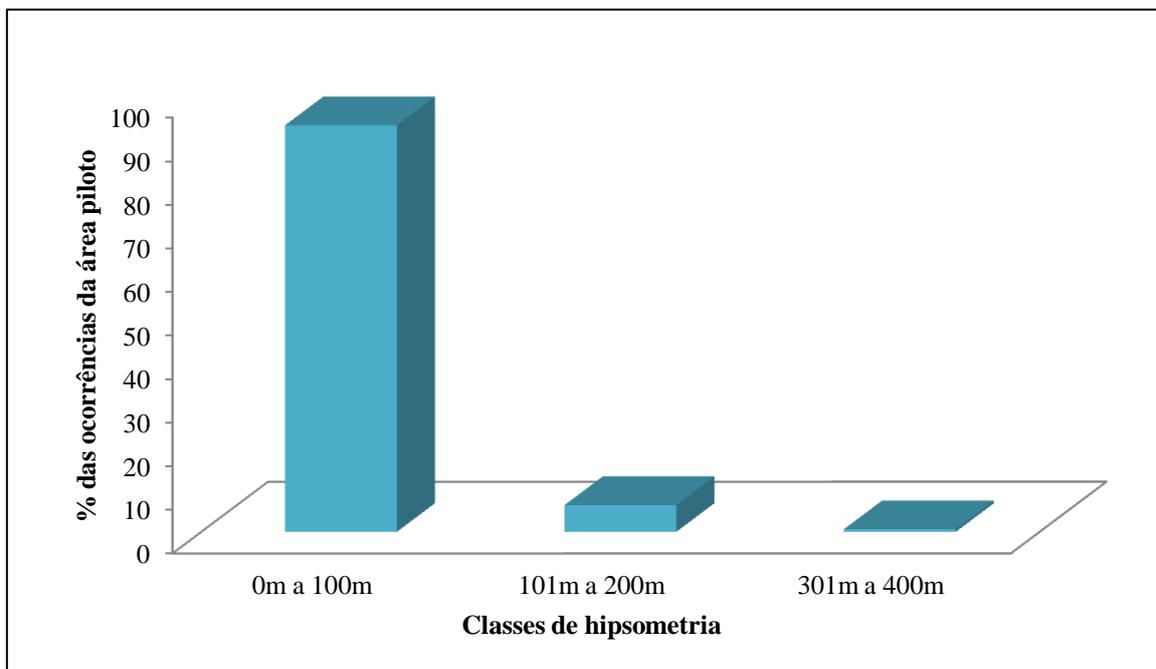


Figura 5.7 – Distribuição dos acidentes em relação às classes de hipsometria.

5.2 CURVAS DE PROBABILIDADE DE RUPTURA

Passa-se, agora, à explanação dos resultados obtidos na etapa de determinação da probabilidade de ruptura em função da chuva acumulada.

É importante ressaltar que os resultados alcançados nesta fase da pesquisa não sofreram tanta interferência do posicionamento equivocado dos pontos de acidentes geotécnicos, uma vez que as áreas de influência de cada estação foram concebidas de forma mais ampla, o que conferiu uma boa acurácia quanto à vinculação de cada evento de escorregamento com coordenadas definidas no interior das regiões pertencentes aos postos pluviométricos. Além disso, para os demais casos, a decisão de utilizar a mesma estação prescrita nos relatórios da Fundação Geo-Rio, imputou a idoneidade necessária.

Nota-se, como aspecto marcante, a diferenciação entre cada uma das curvas que se referem aos diversos agrupamentos de estações. Isto implica no fato de que cada região composta pela união das áreas de influência das estações ou, em alguns casos, para os postos que permaneceram isolados, reage de forma diferenciada à quantidade de precipitação acumulada.

Portanto, tudo indica que há fatores inerentes a natureza da região, externos a ação da precipitação, que governam os diferentes comportamentos observados, sendo que esta distinção está presente, tanto na forma, quanto na amplitude da probabilidade de ruptura fornecidas pelas curvas. Observa-se ainda que, para a ausência de precipitação acumulada, a probabilidade de ruptura não se torna nula como seria esperado, já que os acidentes que

ocorreram na ausência de chuva foram desconsiderados nos cálculos. Estes valores não nulos foram incorporados devido ao processo de interpolação na criação das curvas, de forma que não devem ser considerados como os valores de probabilidade de ruptura para os casos de acidentes circunstanciais.

As diversas curvas de probabilidade de ruptura contra precipitação acumulada de 1 hora para os grupos associados de estações estão representadas na Fig. 5.8.

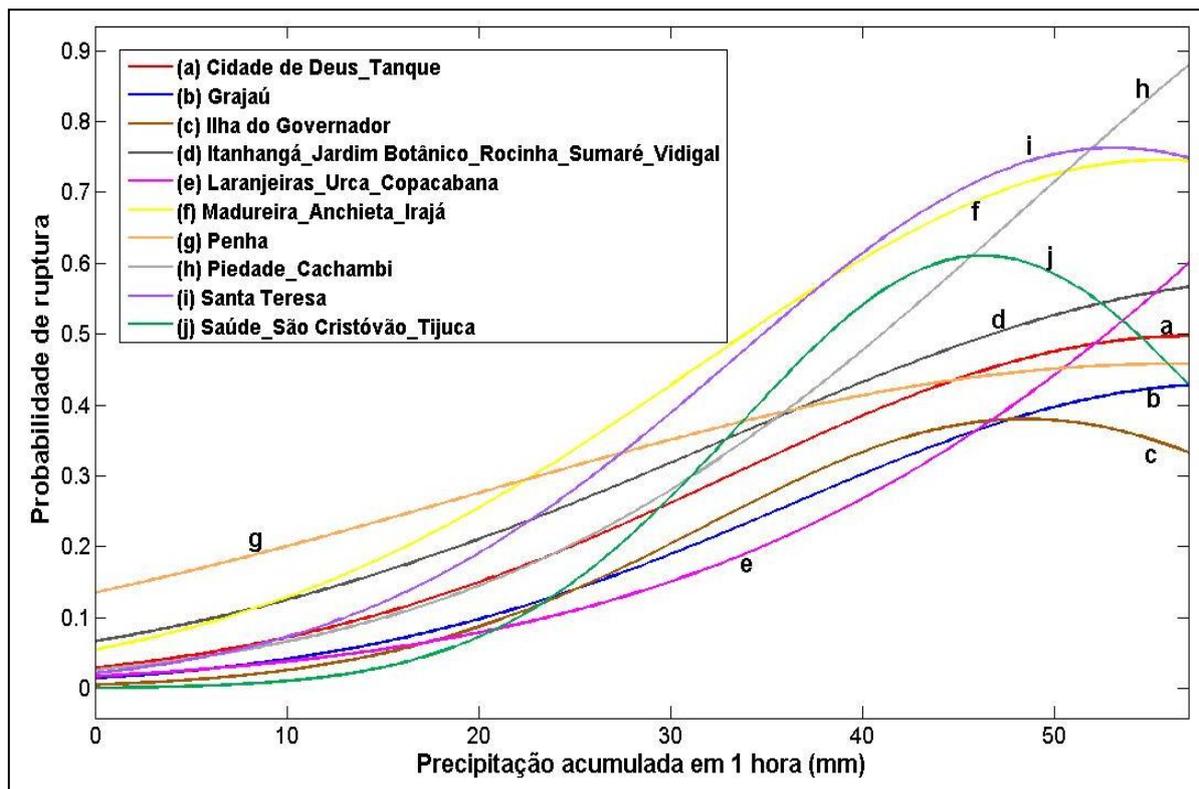


Figura 5.8 – Curvas de probabilidade de ruptura contra precipitação acumulada de 1 hora.

Destaca-se, também, a existência de curvas que permanecem fornecendo valores de probabilidade de ruptura próximos até uma determinada precipitação. É o caso do conjunto composto pelos postos Saúde/São Cristóvão/Tijuca, conjuntamente com as estações de Grajaú, Ilha do Governador e o grupo Laranjeiras/Urca/Copacabana. As respectivas curvas mantêm o mesmo padrão até uma precipitação acumulada em torno de 20 mm, sendo que, a partir daí, os comportamentos passam a divergir entre si.

Com relação à forma das curvas, observa-se uma similaridade entre os grupos Itanhangá/Jardim Botânico/Rocinha/Sumaré/Vidigal, Grajaú, Ilha do Governador, Cidade de Deus/Tanque, Madureira/Anchieta/Irajá e Santa Teresa, que se encontra retratada na Fig. 5.9.

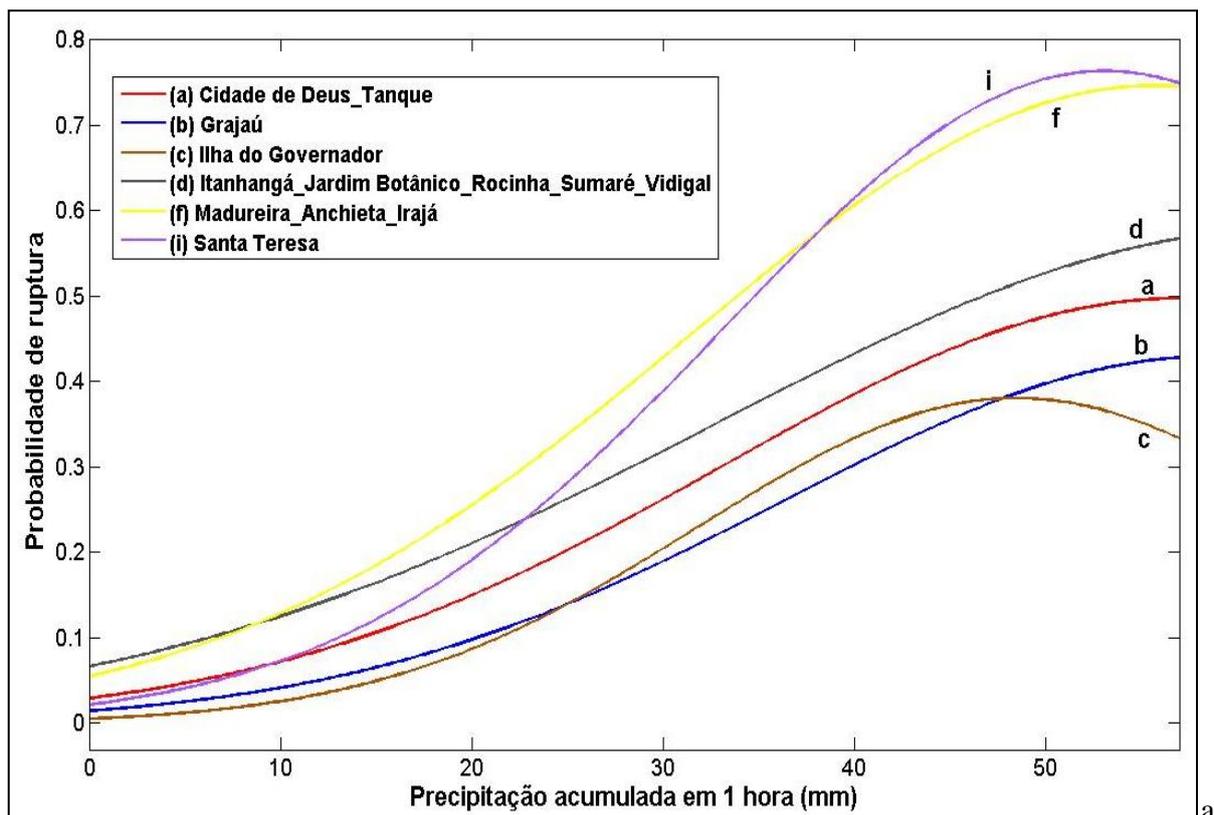


Figura 5.9 – Curvas de probabilidade de ruptura contra precipitação acumulada de 1 hora que apresentam formas similares.

Apesar de delinearem-se com um formato relativamente próximo, a resposta fornecida por duas curvas diferentes em relação a um mesmo acumulado pluviométrico apresenta uma disparidade, que é causada pela taxa de crescimento diferenciada da probabilidade de ruptura frente à precipitação acumulada.

Exemplo disto seria a confrontação da estação da Ilha do Governador em relação à estação de Santa Teresa. Para um acumulado de 50 mm de chuva em 1 hora, a probabilidade de ruptura fornecida pelo primeiro posto citado a pouco, é de aproximadamente 37,8%, enquanto que a curva da segunda estação citada apresenta uma probabilidade de ruptura de 75% para o mesmo valor de chuva, concluindo-se que algumas áreas resistem melhor à atuação da precipitação, quando comparadas com outras.

As demais curvas não podem ser consideradas similares sob os critérios de semelhança de forma e de previsão de probabilidade de ruptura. Elas estão representadas na Fig. 5.10, juntamente com a curva da estação Grajaú, representante do grupo de curvas passíveis de serem agrupadas e que foi citado anteriormente, para efeito de comparação.

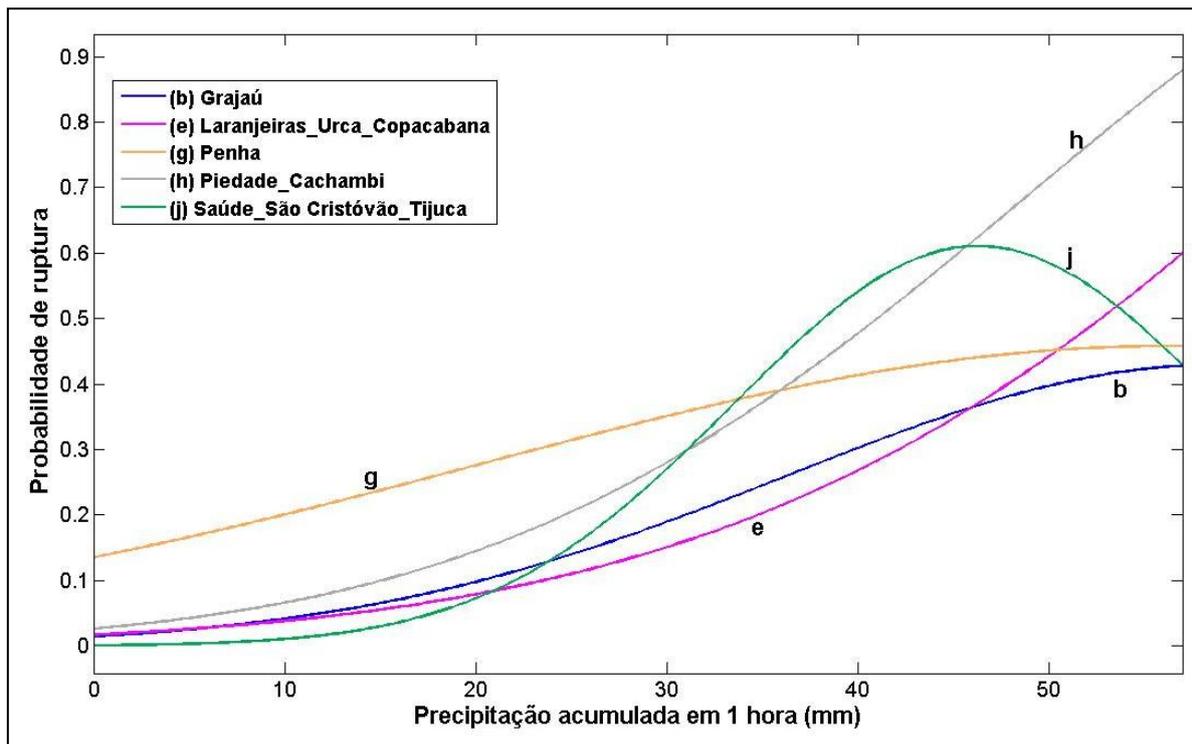


Figura 5.10 – Curvas distintas de probabilidade de ruptura contra precipitação acumulada de 1 hora.

Dentre todas apontadas, a curva que mais destoa das demais, em se tratando da forma, é a que representa a estação da Penha. Isto é consequência da configuração da variação das probabilidades de ruptura encontradas para os acumulados de chuva associados aos níveis de alerta. A probabilidade de ruptura atrelada ao nível alto mostrou-se com um valor inferior àquelas calculadas, tanto para o nível médio, quanto para o nível muito alto, resultando no ajuste diferenciado para este posto pluviométrico.

A curva da associação relativa às estações Piedade e Cachambi, juntamente com a curva relativa ao conjunto Laranjeiras/Urca/Copacabana, assemelham-se no quesito formato ao grupo, que a curva da estação Grajaú representa. No entanto, ambas apresentam-se com um comportamento continuamente crescente, sem mostrar um patamar de estabilização da probabilidade de ruptura, sendo então, por esta razão, consideradas como curvas específicas.

Um fato aparentemente contraditório, antes observado em outros postos como na Ilha do Governador e em Santa Teresa, encontra-se destacado com proeminência na curva do conjunto das estações Saúde, São Cristóvão e Tijuca. Nestes casos, com o aumento da precipitação acumulada, a probabilidade de ruptura cresce, atinge um valor máximo e, logo após, começa a diminuir.

Teoricamente, a probabilidade de ruptura tenderia a aumentar com o acúmulo de chuvas. Entretanto, o que se verificou nestes casos foi uma menor incidência do número de

ocorrências de escorregamentos para o nível muito alto, o que acarretou um decréscimo da probabilidade de ruptura deste patamar.

Propõe-se, como hipótese para a elucidação deste caso, a explicação que estas regiões respondem satisfatoriamente em relação à deflagração de escorregamentos, quando submetidas à ação de precipitações acumuladas pertencentes ao intervalo definido pelo nível alto, materializando, neste momento, a quase totalidade de instabilidades potenciais em acidentes reais.

A condição das encostas que se estabelece para o nível de acumulado de precipitação imediatamente posterior, que seria o nível muito alto, corresponde a um estado central de equilíbrio com os diversos processos nelas atuantes, de forma que a ação das chuvas seria minimizada neste contexto. Desta forma, a redução apresentada pela probabilidade de ruptura seria consequência direta desta configuração estável assumida.

Em se tratando das curvas de probabilidade de ruptura em decorrência da precipitação acumulada para 24 horas, o resultado é mostrado na Fig. 5.11.

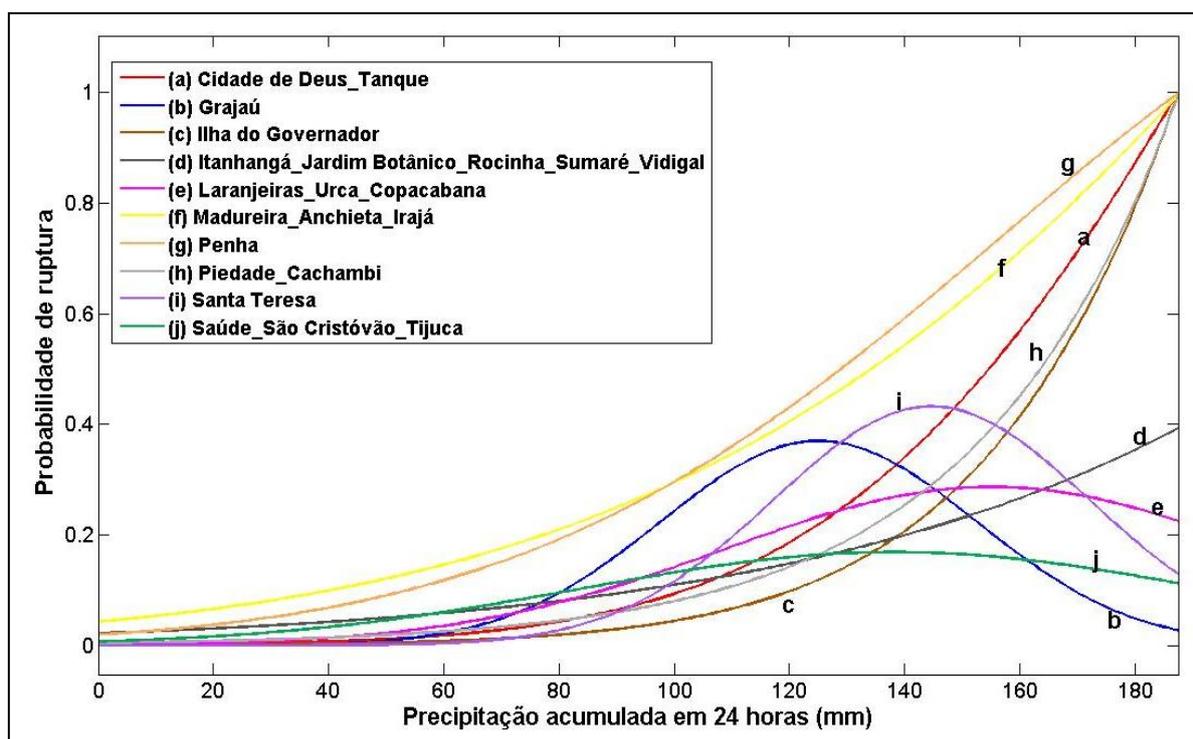


Figura 5.11 – Curvas de probabilidade de ruptura contra precipitação acumulada de 24 horas.

Muitos dos pontos que foram levantados quanto à distribuição relacionada ao acumulado horário, podem ser estendidos para a análise das curvas de chuva acumulada diária. De forma geral, assim como nas primeiras curvas apresentadas, ainda é observada uma variedade no que se refere às formas e aos valores de probabilidade de ruptura previstos,

corroborando com a ideia de que as características próprias destas regiões atuam decisivamente na resposta ímpar fornecida por cada uma diante a chuva.

No entanto, aqui já se observa um padrão bem definido e semelhante para um grupo de curvas, permitindo deduzir que estas estações mostram respostas aproximadas quando solicitadas por quantidades iguais de chuva.

Pela Fig. 5.12, este conjunto de postos com aparências idênticas, quanto à forma das curvas, encontram-se relacionados abaixo:

- Conjunto formado por Cidade de Deus e Tanque;
- Estação da Ilha do Governador;
- Conjunto formado por Madureira, Anchieta e Irajá;
- Conjunto formado por Piedade e Cachambi.

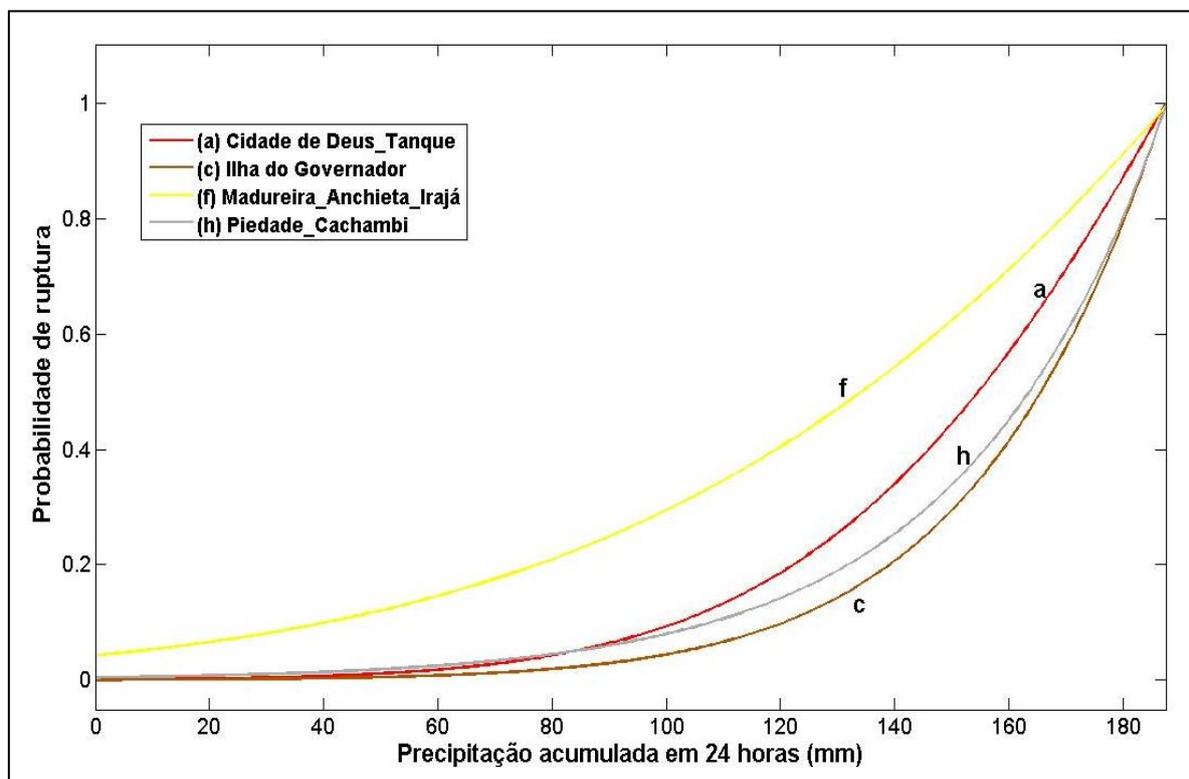


Figura 5.12 – Curvas de probabilidade de ruptura contra precipitação acumulada de 24 horas agrupadas que apresentam comportamento próximo.

O segundo e o quarto elementos do conjunto acima apresentam, conforme destacado na figura anterior, configurações extremamente parecidas, fornecendo respostas relativamente próximas para todo o intervalo de chuva acumulada diária. Para acumulados pluviométricos acima de 180 mm diários, as curvas de ambos os elementos mencionados se sobrepõem, determinando a mesma probabilidade de ruptura.

Os ajustes dos dados referenciados às estações de Santa Teresa e Grajaú, juntamente com o conjunto formado pelos postos de Saúde, São Cristóvão e Tijuca e pelo grupo composto por Laranjeiras, Copacabana e Urca, demonstram também o comportamento já antes relatado, que se refere ao fato das curvas atingirem um valor máximo, decrescendo após isso. A Fig. 5.13 destaca estas curvas.

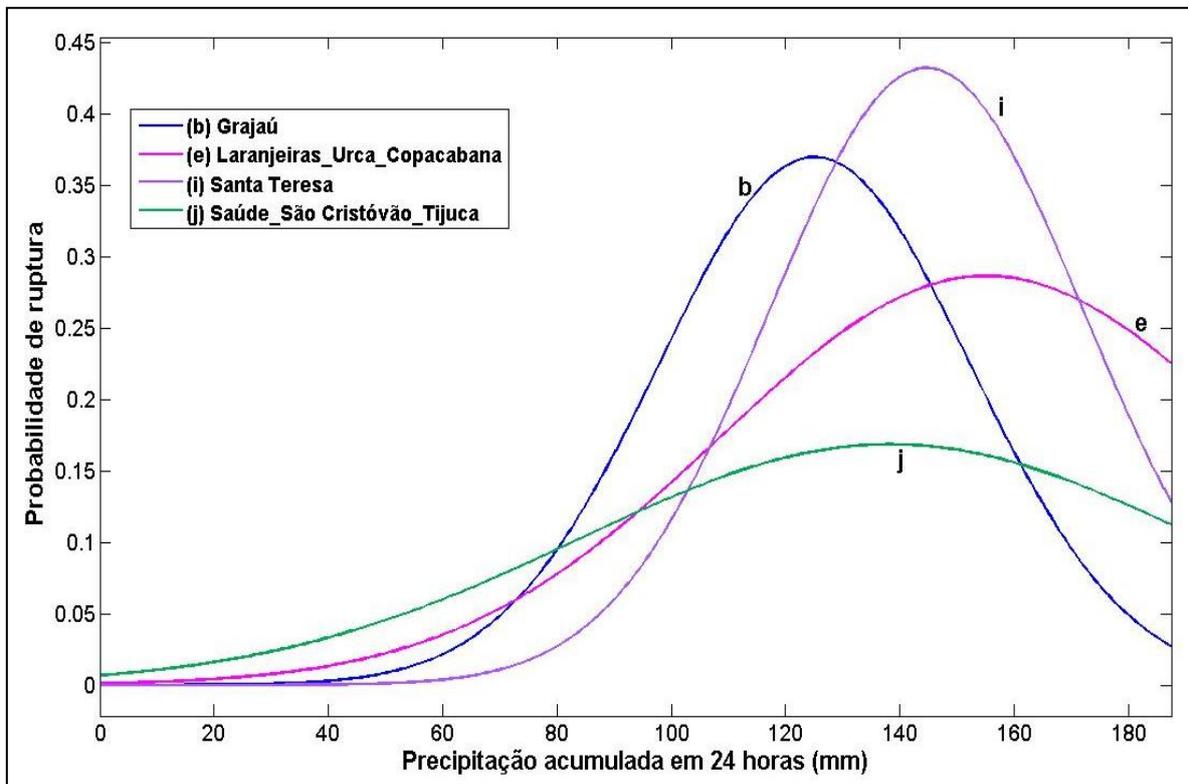


Figura 5.13 – Curvas de probabilidade de ruptura, referentes à precipitação acumulada de 24 horas que apresentam pico.

Novamente, utilizam-se os mesmos argumentos para explicar de maneira plausível este acontecimento, sendo que a diminuição da probabilidade de ruptura com o aumento da pluviosidade acumulada se dá em virtude do ganho de estabilidade destas regiões, promovido pela determinação da maioria dos acidentes sob a ação de acumulados menores, o que leva a uma situação de equilíbrio.

Traçando-se um paralelo entre o que foi obtido para o acumulado de 1 hora e para o acumulado diário, conclui-se que um mesmo grupo de estações responde de maneiras distintas a estes dois cenários, ressaltando a influência da distribuição temporal das chuvas.

Algumas curvas apresentam padrões totalmente diferentes, quando confrontadas em relação a estes acumulados pluviométricos. As Fig. 5.14 e Fig. 5.15 retratam melhor este fato.

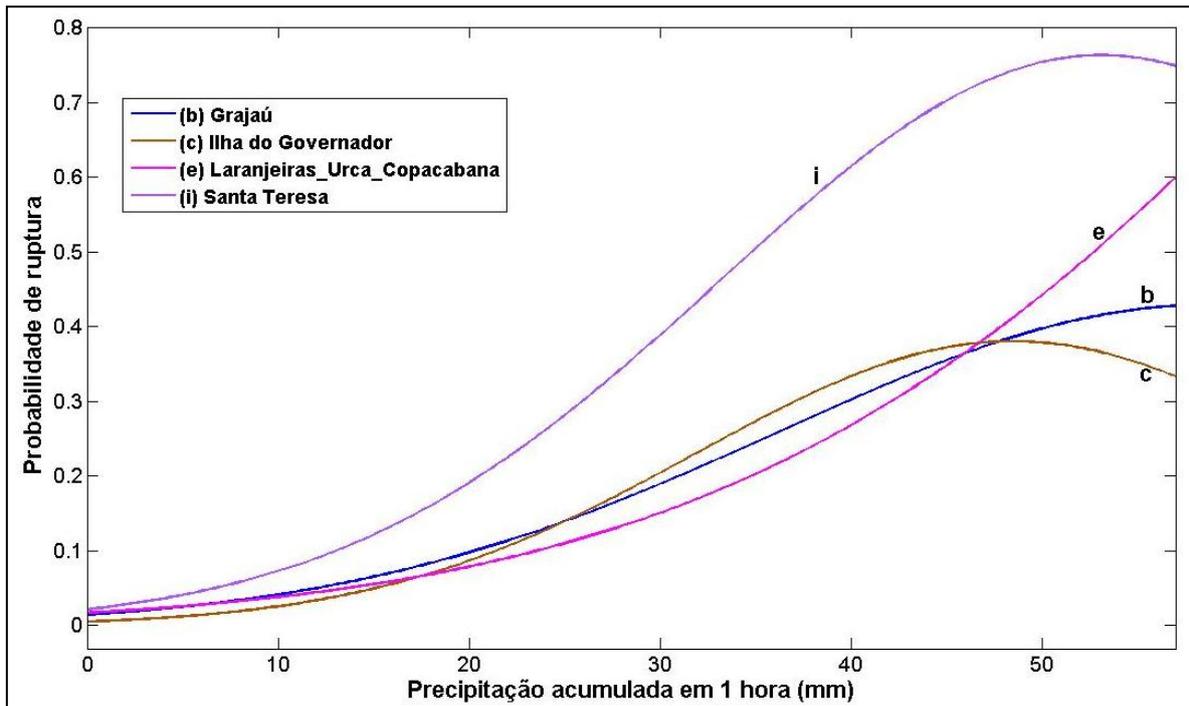


Figura 5.14 – Curvas comparativas de probabilidade de ruptura referentes à precipitação acumulada de 1 hora.

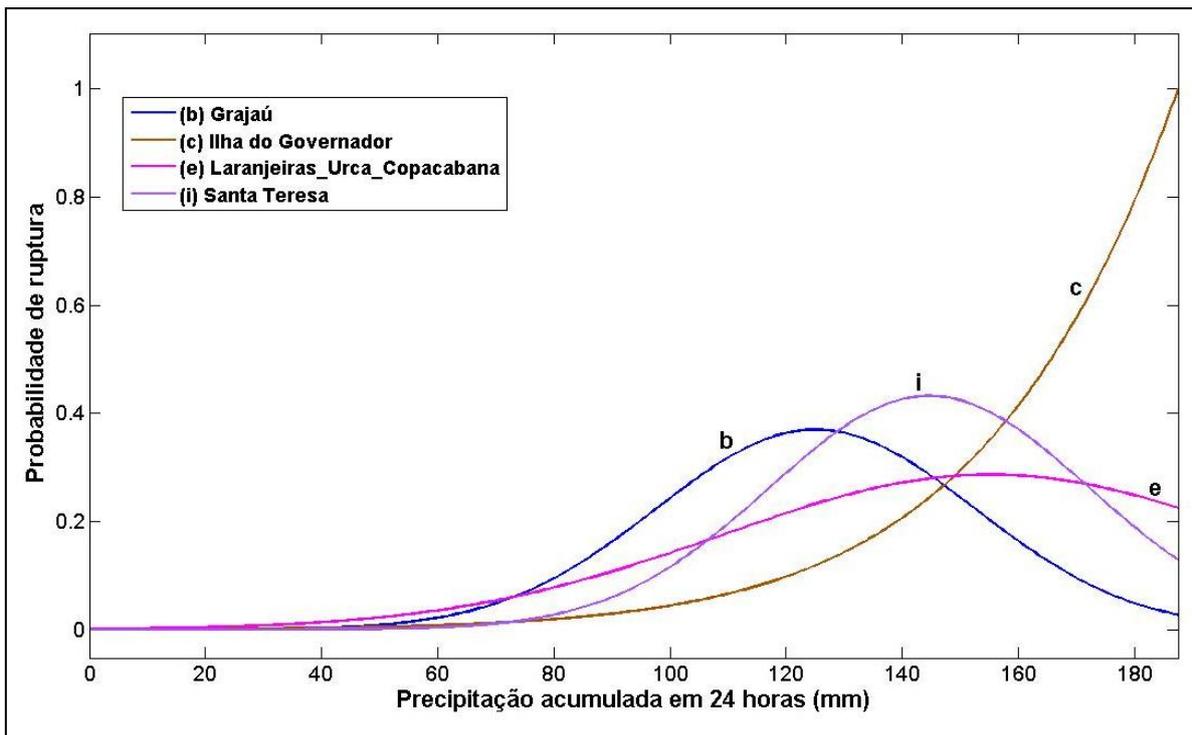


Figura 5.15 – Curvas comparativas de probabilidade de ruptura referentes à precipitação acumulada de 24 horas.

Como pode ser percebido, nas estações de Santa Teresa e Grajaú, as formas de suas representações alteraram-se quando se passou da análise do acumulado horário para o diário. Há também a mudança da probabilidade de ruptura alcançada pelos postos, de forma que

ambas resistem melhor à atuação de precipitações diárias. Já a estação Ilha do Governador, mostrou-se estável para acumulado diário inferior a 60 mm, de forma que, a partir disto, aumenta rapidamente sua probabilidade de ruptura em função da chuva. Destaca-se também, neste caso, a mudança de forma conseguida nas duas análises.

Diante do exposto, conclui-se que as características intrínsecas de cada região como geologia, geomorfologia, uso do solo, entre outras, além de promover a diferença de comportamento entre estações frente a um mesmo acumulado de chuva, imprime também uma variação na resposta de uma mesma estação diante da distinção temporal da precipitação.

O conjunto formado pelos postos de Laranjeiras, Copacabana e Urca, também mostraram alteração nas formas dos ajustes dos pontos entre as duas condições de chuva acumulada, de forma que o acumulado de 24 horas fornece probabilidade de ruptura menor.

5.3 ANÁLISE DE COMPONENTES PRINCIPAIS

A partir da análise de componentes principais realizada, utilizando as classes geológico-geotécnicas, de uso do solo, de declividade e de hipsometria que apresentaram pelo menos uma ocorrência de deslizamento a elas associadas, procurou-se averiguar quais as relações existentes entre as características destes dados. Os escorregamentos aqui referidos correspondem àqueles os quais foram passíveis de serem localizados no espaço.

As unidades que estão atreladas a algum acidente somam 22 classes e já foram explicitadas na parte inicial deste capítulo.

Uma vez processada a análise de componentes principais e de posse de seus resultados, constatou-se que a variância do grupo se encontra especialmente distribuída pelas três primeiras componentes principais, com uma clara descontinuidade entre a primeira e a segunda componentes.

Além disso, destaca-se que a primeira componente principal é responsável por quase 80% de toda a variabilidade do conjunto, de maneira que, ao incorporar a segunda componente, este percentual sobe para 88%. Assim, podem-se utilizar apenas estas duas componentes na explicação das informações, reduzindo de maneira razoável o número de dimensões necessárias para a visualização dos dados. O diagrama de Pareto, explicitando a porcentagem da variabilidade para cada uma das componentes principais, está mostrado na Fig. 5.16.

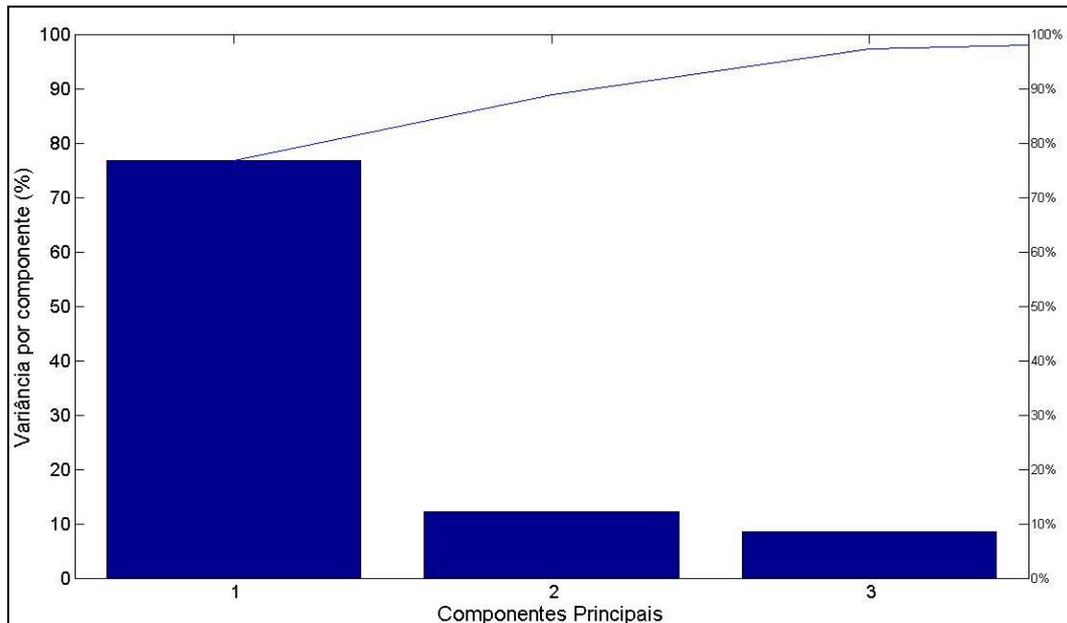


Figura 5.16 – Diagrama de Pareto mostrando a distribuição da variabilidade pelas componentes principais.

A Fig. 5.17 traz o gráfico que retrata diversas variáveis da análise em função apenas das duas primeiras, e mais representativas, componentes principais.

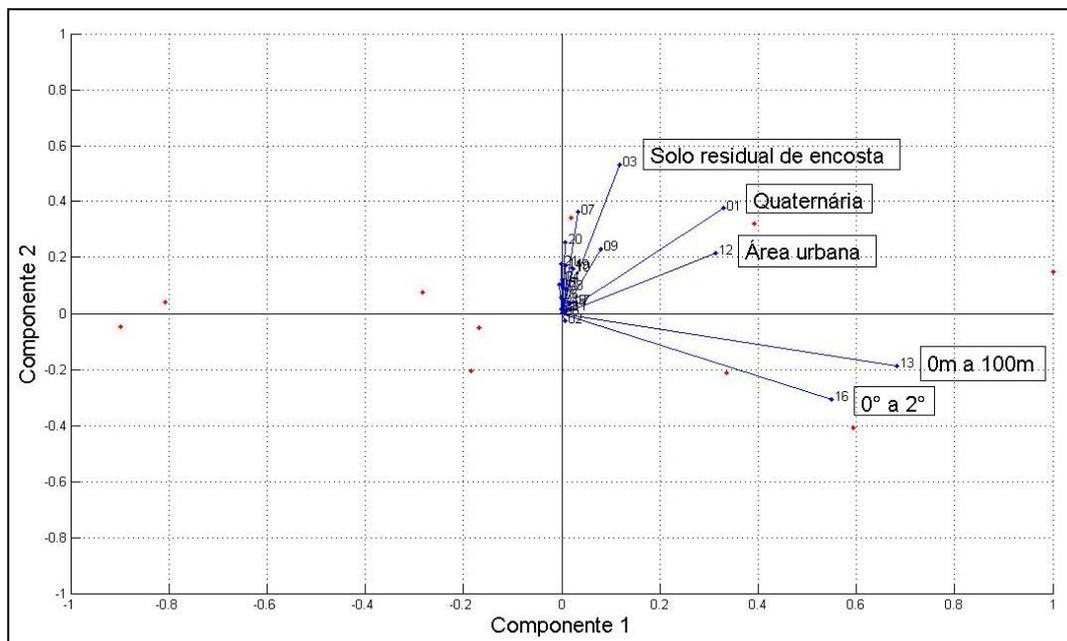


Figura 5.17 – Representação das componentes principais e suas variáveis.

No referido gráfico, o eixo horizontal representa a primeira componente principal, estando orientado positivamente para a direita e a segunda componente está vinculada ao eixo vertical, com orientação positiva para cima. Cada uma das 22 variáveis está representada no gráfico sob a forma de vetores, onde o seu comprimento e direção indicam como cada uma destas variáveis contribui em relação às duas componentes principais indicadas. Observa-se

que as componentes principais possuem coeficientes positivos para quase todas as 22 variáveis. Enfatiza-se ainda a existência de cinco variáveis que se sobressaem na constituição do meio físico estudado, o que é o demonstrado exatamente pelo tamanho diferenciado que os respectivos vetores apresentam na figura precedente.

Especificamente para as cinco variáveis que se destacaram, observa-se que a unidade relacionada ao solo residual de encosta com espessura maior que 2 m contribui positivamente em relação às duas componentes principais responsáveis pela maior parte da variância do conjunto de dados, uma vez que o vetor correspondente a esta classe está direcionado no sentido positivo de ambas as componentes. Este mesmo comportamento também é observado para os sedimentos quaternários e para a área urbana. Já as variáveis referentes à classe de hipsometria de 0 m a 100 m, e a classe de declividade variando de 0° a 2° mostraram coeficientes positivos para a primeira componente principal, mas forneceram coeficientes negativos para a segunda componente principal.

Assim, estas cinco classes agem positivamente no sentido de formar a primeira componente principal, que é responsável por 76% de toda a variância analisada nos dados. De outra forma, pode-se concluir, também, que a segunda componente principal faz distinção entre aqueles conjuntos de estações que demonstram valores altos para as classes de solo residual de encosta, sedimentos quaternários e área urbana e valores baixos para a hipsometria de 0 m a 100 m, e a classe de declividade variando de 0° a 2°, ou, ao contrário, para aqueles conjuntos de estações que possuem altos valores para as duas últimas classes citadas e baixos valores para as demais.

Portanto, o desenvolvimento desse tipo de análise permitirá, em pesquisas futuras, estabelecer uma diferenciação concreta focada nas propriedades do meio físico que permita instituir e explicar as respostas distintas frente à chuva para cada região, as quais foram observadas na composição das curvas de probabilidade de ruptura.

6 CONCLUSÕES

As análises processadas ao longo da pesquisa permitiram estabelecer algumas conclusões acerca do relacionamento entre precipitação e o desencadeamento de deslizamentos. O presente trabalho teve como objetivo maior o desenvolvimento de uma metodologia capaz de inserir variados elementos que corroboram para a explicação dos acidentes.

6.1 CONCLUSÕES SOBRE A DISTRIBUIÇÃO DOS ACIDENTES

Com relação à distribuição espacial dos escorregamentos, observa-se que esta se processa de maneira irregular pela área piloto, concentrando-se, no entanto, em alguns locais.

As regiões compostas pelos morros isolados da zona norte, bem como a porção norte do maciço da Tijuca, apresentam maior incidência de ocorrências, sendo que este resultado é ratificado pela grande concentração de acidentes em áreas consideradas urbanas.

A classe referente ao solo residual de encosta com espessura superior a 2 m destacou-se no quesito geológico-geotécnico, pela grande frequência de escorregamentos que lhe foi associada. Para declividades consideradas baixas, referentes ao intervalo de 10° a 30°, houve também uma presença significativa de ocorrências.

Entretanto, discordâncias foram observadas em relação aos resultados de algumas classes de declividade, de hipsometria e do aspecto geológico-geotécnico, quando confrontados com a literatura especializada.

Presume-se que estas consequências surgiram em decorrência da maneira como se estabeleceram as coordenadas dos acidentes, as quais se caracterizam por ter uma natureza aproximada, cuja acurácia conseguida não se mostrou adequada ao presente trabalho.

Outra justificativa possível estaria no grau inadequado de representatividade contido nas cartas geológico-geotécnica, topográfica e daquelas derivadas desta última.

6.2 CONCLUSÕES SOBRE AS CURVAS DE PROBABILIDADE DE RUPTURA

A distinção entre as curvas obtidas para os variados grupos de estações é uma característica clara destes resultados. Desta forma, conclui-se que cada região apresenta um comportamento ímpar perante o acumulado pluviométrico.

Outra observação que se depreende, seria que o fator temporal atrelado às chuvas também influencia na reação mostrada pelo terreno, uma vez que, fazendo-se uma comparação entre as curvas do acumulado diário e do acumulado horário, isto em relação a uma mesma estação, a distinção permanece presente entre elas.

Portanto, pode-se deduzir que as características próprias de cada região, como declividade, geologia, uso do solo e hipsometria imprimem a maneira como o local irá suportar a solicitação imposta pela precipitação.

Os aspectos que foram levados em consideração para distinguir as curvas, baseados nas formas e nos valores de probabilidade de ruptura previstos permitiram contemplar que, mesmo entre conjuntos que se ajustaram de forma semelhante, a probabilidade de ruptura prevista por elas pode ser extremamente discrepante, principalmente com o aumento do acumulado pluviométrico.

Para intervalos específicos de precipitação acumulada, notou-se que alguns elementos permaneceram bem próximos, oferecendo resultados da mesma ordem com relação à probabilidade de ruptura. Isto leva a crer que, mesmo combinações variadas de características específicas relacionadas a diferentes locais, podem convergir para respostas idênticas sob a atuação de uma mesma chuva.

Diante do exposto, é observada a necessidade da adoção de critérios de alertas distintos para cada região representada por uma determinada curva, capazes de contemplar as suas particularidades individuais demonstradas quando sujeitas a ação da precipitação. Esta medida permitiria uma maior eficácia quanto à previsão da ocorrência de acidentes por parte do sistema de alerta.

Outro episódio comentado foi o decréscimo da probabilidade de ruptura com o aumento da chuva acumulada para certos conjuntos de estações, configurando-se como um efeito incoerente.

Esta situação se deu em virtude da diminuição da razão entre o número de acidentes e a contagem total de acumulados para o nível de alerta muito alto. A incidência de escorregamentos associados a este nível é relativamente menor, quando comparados com os demais.

Levantou-se como hipótese para a explicação desses episódios, o fato de que o grande potencial de escorregamentos esteja vinculado aos acumulados pluviométricos relativos ao nível de alerta alto, o qual, realmente, apresenta uma maior probabilidade de ruptura. Consequentemente, com a concretização destes acidentes, as encostas tomam uma configuração mais estável, promovendo uma redução da quantidade de deslizamentos para o nível muito alto.

6.3 CONCLUSÕES SOBRE A ANÁLISE ESPACIAL

A investigação das unidades as quais tiveram ocorrências de escorregamentos associadas permitiu verificar a parcela de representatividade espacial que cada uma contribui na composição da área piloto em relação aos dez grupos associados de estações.

Assim sendo, por meio da análise de componentes principais, observou-se que a variância da coletânea de dados ficaria bem representada pelas duas primeiras componentes principais.

Isso permitiu a redução do número de variáveis originais que explicitam as informações, passando agora para a representação com apenas duas e fornecendo, ainda, uma melhor visualização desta distribuição.

Houve o destaque de cinco características na constituição das duas componentes principais mais representativas, sendo que a segunda componente principal faz distinção entre os conjuntos de estações que apresentam valores altos para algumas destas classes e valores baixos para as demais.

A existência destas variações comportamentais presentes entre áreas de estações distintas é o que deve explicar a reação perante a precipitação, devendo este estudo ser aprofundado.

6.4 CONCLUSÕES SOBRE A METODOLOGIA UTILIZADA

Conclui-se que a abordagem utilizada na metodologia apresentada configurou-se apropriada, mediante os resultados obtidos.

O uso do programa SPRING na manipulação e visualização de dados espaciais, configurou-se como uma ferramenta essencial para o desenvolvimento das análises envolvidas no trabalho.

Da mesma forma, o tratamento das informações de escorregamentos e de chuva ficaria inviabilizada sem o uso do programa MatLab, em razão do montante de dados envolvidos e da necessidade de geração de novas funções específicas ao problema. Além disso, tal programa possui rotinas relacionadas à análise de componentes principais que se mostraram bastante úteis.

Embora uma parcela dos resultados tenha apresentado discordâncias quando comparada com aqueles encontrados na literatura técnica, isto não ocorreu devido a inconsistências inseridas na parte metodológica, e sim pela qualidade da exatidão dos dados de entrada.

Portanto, enfatiza-se a necessidade do uso de informações consistentes, principalmente cartográficas e de posicionamento de escorregamentos, com um grau de acurácia compatível com a escala de trabalho, capaz de fornecer resultados idôneos.

6.5 SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

Algumas recomendações para trabalhos futuros são listadas a seguir:

- Incorporação de novos elementos, que caracterizem as ocorrências, como volume escorregado e classificação dos acidentes, aumentando a representatividade dos dados;
- Obtenção e utilização de informações cartográficas e de posicionamento dos deslizamentos com maior detalhamento e melhor exatidão espacial, juntamente com a ampliação temporal do banco de dados de escorregamentos;
- Aplicação da metodologia descrita a outras regiões com características semelhantes para uma eventual confrontação dos resultados encontrados;
- Uso de acumulados pluviométricos estabelecidos para outras regiões tropicais montanhosas, como, por exemplo, Hong Kong e Medellín, e a consequente comparação do desempenho destes limiares de chuva com os propostos para o Rio de Janeiro, bem como o desenvolvimento das curvas de probabilidade de ruptura associadas ao acumulado de 96 horas;
- Adequação e aperfeiçoamento da metodologia proposta com a inserção de novas rotinas no intuito de reforçá-la cada vez mais, do ponto de vista teórico. Melhorar o processo de definição das áreas de influência que levam em consideração fatores relacionados ao clima, à topografia e à hidrologia, inserindo-os de forma mais efetiva neste cenário;
- Expansão da pesquisa para todo o município, levando em consideração toda a rede pluviométrica pertencente à Geo-Rio, juntamente com o esforço para a elaboração de acumulados pluviométricos distintos que contemplem as particularidades de cada área;
- Prosseguir e desenvolver a abordagem iniciada neste trabalho, baseando-se na análise de componentes principais, no que se refere quantificar a importância de elementos, como a geologia, declividade, hipsometria e uso do solo na diferenciação das respostas obtidas e que se encontram representadas pelas curvas de probabilidade de ruptura que foram mostradas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALCÁNTARA-AYALA, I. (2002). Geomorphology, Natural Hazard, Vulnerability and Prevention of Natural Disasters in Developing Countries. *Geomorphology*, 47(1): 107-124.
- ALEOTTI, P. (2004). A warning system for rainfall-induced shallow failures. *Engineering Geology*, 73(3-4): 247-265.
- AMARAL, C. P. (1997). Escorregamentos no Rio de Janeiro: Inventário, Condicionantes e Redução de Risco. Tese de Doutorado, PUC, Rio de Janeiro, RJ, 269 p.
- ANDERSON, S.A. & SITAR, N. (1995). Analysis of Rainfall-induced Debris Flows. *Journal of Geotechnical Engineering*, 121(7): 544-552.
- ARMAZÉM DE DADOS (2010). Características gerais da população do município do Rio de Janeiro – 2010. Censo Demográfico 2010, Instituto Pereira Passos, Rio de Janeiro, RJ, 1 p. Disponível em <www.armazemdedados.rio.rj.gov.br>. Acesso em 2 Agosto 2011.
- ARISTIZÁBAL, E., MARTÍNEZ, H. & VÉLEZ, J.I. (2010). A review on the study of mass movement triggered by rains (in Spanish). *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 34(131): 119-227.
- AUGUSTO FILHO, O. & VIRGILI, J.C. (1998). Estabilidade de Taludes. *Geologia de Engenharia*, A.M.S. Oliveira & S.N.A. Brito (eds.), Oficina de textos, São Paulo, pp. 243-269.
- BRAND, E.W., PREMCHITT, J. & PHILLIPSON, H.B. (1984). Relationship between rainfall and landslides in Hong Kong. 4th International Symposium on Landslides, ISSMGE, Toronto, Canada, 1: 377-384.
- BRAND, E.W. (1989). Correlation between rainfall and landslides. 12th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Rio de Janeiro, Brasil, 1:70-72.
- BRUNSDEN, D. (2002). The fifth Glossop Lecture. Geomorphological roulette for engineers and planners: some insights into a old game. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 35(2): 101-142.
- CAINE, N. (1980). The rainfall intensity-duration control of shallow landslides and debris flows. *Geografiska Annaler*, 62A(1-2): 23-27.
- CÂMARA, G. & DAVIS, C. (2001). Introdução. *Introdução à Ciência da Geoinformação*, G. Câmara, C. Davis & A.M.V. Monteiro (eds.), INPE, São José dos Campos, pp. 1.1-1.5.
- CÂMARA, G. & MONTEIRO, A.M.V. (2001). Conceitos Básicos em Ciência da Geoinformação. *Introdução à Ciência da Geoinformação*, G. Câmara, C. Davis & A.M.V. Monteiro (eds.), INPE, São José dos Campos, pp. 2.1-2.35.
- CÂMARA, G., SOUZA, R.C.M., FREITAS, U.M., GARRIDO, J & MITSUO, F. (1996). Spring: integrating remote sensing and gis by object-oriented data modeling. *Computers & Graphics*, 20(3): 395-403.

- CERRI, L.E.S. (1993). Riscos geológicos associados a escorregamentos: uma proposta para prevenção de acidentes. Tese de Doutorado, UNESP, Rio Claro, SP, 197 p.
- CHO, S.E. & LEE, S.R. (2001). Instability of unsaturated soil slopes due to infiltration. *Computers and Geotechnics*, 28(3): 185-208.
- CHO, S.E. & LEE, S.R. (2002). Evaluation of Surficial Stability for Homogeneous Slopes Considering Rainfall Characteristics. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 128(9): 756-763.
- COLLINS, B.D. & ZNIDARCIC, D. (2004). Stability Analyses of Rainfall Induced Landslides. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 130(4): 362-372.
- COROMINAS, J. (2000). Landslides and Climate. 8th International Symposium on Landslides, ISSMGE, Cardiff, País de Gales, 4: 1-33.
- CROSTA, G. (1998). Regionalization of rainfall threshold: an aid for landslide susceptibility zonation. *Environmental Geology*, 35(2-3): 131-145.
- CROSTA, G. & FRATTINI, P. (2003). Distributed Modeling of Shallow Landslides Triggered by Intense Rainfall. *Natural Hazard and Earth System Sciences*, 3: 81-93.
- CRUDEN, D.M. (1991). A Simple Definition of a Landslide. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*, 43(1): 27-29.
- DAI F.C., LEE C.F. & NGAI Y.Y. (2002). Landslide risk assessment and management: an overview. *Engineering Geology*, 64(1): 65 – 87.
- DANTAS, M.E. (2000). Geomorfologia do Estado do Rio de Janeiro. Estudo Geoambiental do Estado do Rio de Janeiro, CPRM – Serviço Geológico do Brasil, Brasília, Brasil, 63 p.
- DAVIS C. & CÂMARA G. (2001). Arquitetura de Sistemas de Informação Geográfica. Introdução à Ciência da Geoinformação, G. Câmara, C. Davis & A.M.V. Monteiro (eds.), INPE, São José dos Campos, pp. 3.1-3.35.
- D'ORSI, R., FEIJÓ, L. & PAES, N.M. (2000). Relatório de Escorregamentos de 1999. Relatório, Fundação Geo-Rio, Rio de Janeiro, RJ, 53 p.
- D'ORSI, R., FEIJÓ, L. & PAES, N.M. (2002). Relatório de Escorregamentos de 2001. Relatório, Fundação Geo-Rio, Rio de Janeiro, RJ, 58 p.
- EYLES, R.J. (1979). Slip triggering rainfalls in Wellington City, New Zealand. *New Zealand Journal of Science*, 22(2): 117-121.
- EYLES, R.J., CROZIER, M.J. & WHEELER, R.H. (1978). Landslides in Wellington City. *New Zealand Geographer*, 34(2): 58-74.
- FEIJÓ, R.L., D'ORSI, R.N. & PAES, N.M. (2004). Relatório de Escorregamentos de 2002. Relatório, Fundação Geo-Rio, Rio de Janeiro, RJ, 36 p.

FERNANDES, M.C., AVELAR, A.S. & NETTO, A.L.C. (2006). Domínios Geo-Hidroecológicos do Maciço da Tijuca, RJ: subsídios ao entendimento dos processos hidrológicos e erosivos. *Anuário do Instituto de Geociências*, 29(2): 120-146.

FERNANDES, N.F. & AMARAL, C.P. (1996). Movimentos de massa: uma abordagem geológica-geomorfológica. *Geomorfologia e Meio Ambiente*, A. J. T. Guerra & S. B. Cunha (eds.), Bertrand, Rio de Janeiro, Brasil, pp. 123-194.

FINLAY, P.J., FELL, R. & MAGUIRE, P.K. (1997). The relationship between the probability of landslide occurrence and rainfall. *Canadian Geotechnical Journal*, 34(6): 811-824.

FUNDAÇÃO GEO-RIO (2005). Cartografia de risco quantitativo a escorregamentos em setores de assentamentos precários na cidade do Rio de Janeiro. Plano Municipal de Redução de Riscos, Fundação Geo-Rio, Rio de Janeiro, RJ, 18 p.

FUNDAÇÃO GEO-RIO (2010). Seção Quem Somos. Secretaria de Obras, RJ. Disponível em < http://obras.rio.rj.gov.br/index.cfm?arquivo_estatico=1541.htm>. Acesso em 17 de Ago. 2010.

GARCÍA, H.A.G. (2004). Avaliação da Susceptibilidade aos Movimentos de Massa Usando Sistemas de Informação Geográfica e Redes Neurais Artificiais. Dissertação de Mestrado, UnB, Brasília, DF, 140 p.

GODT, J.W., BAUM, R.L. & CHLEBORAD, A.F. (2006). Rainfall characteristics for shallow landsliding in Seattle, Washington, USA. *Earth Surface Processes and Landforms*, 3(1): 97-110.

GRAY, D.H. (1970). Effects of forest clear-cutting on the stability of natural slopes. *Bulletin of the Association of Engineering Geologists*, 7(1): 45-66.

GRAY, D.H. & LEISER, A.T. (1982). *Biotechnical Slope Protection and Erosion Control*. Van Nostrand Reinhold Company, New York, USA, 1 vol., 271 p.

GRIFFITHS, J.S., MATHER, A.E. & HART, A.B. (2002). Landslide susceptibility in the Río Aguas catchment, SE Spain. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 35(1): 9-17.

GUIDICINI, G. & IWASA, O.Y. (1976). Ensaio de correlação entre pluviosidade e escorregamentos em meio tropical úmido. Relatório nº 1080, IPT, São Paulo, Brasil, 48 p.

GUIDICINI, G. & NIEBLE, C.M. (1984). *Estabilidade de Taludes Naturais e de Escavação*. Edgard Blücher, São Paulo, 1 vol., 216 p.

GUZZETTI, F., PERUCCACCI S., ROSSI, M. & STARK, C.P. (2008). The rainfall intensity-duration control of shallow landslides and debris flows: an update. *Landslides*, 5(1): 3-17.

HENGXING, L., CHENGHU, Z., LEE, C.F., SIJING, W. & FAQUAN W. (2003). Rainfall-induced landslide stability analysis in response to transient pore pressure. *Science in China*, 46(1): 52-68.

HUTCHINSON, J.N. (1995). Landslide hazard assessment. 6th International Symposium on Landslides, ISSMGE, Christchurch, New Zealand, 3: 1805-1841.

IIRITANO, G., VERSACE, P. & SIRANGELO, B. (1998). Real-time estimation of hazard for landslides triggered by rainfall. *Environmental Geology*, 35(2-3): 175-183.

INFANTI JÚNIOR, N. & FORNASARI FILHO, N. (1998). Processos de Dinâmica Superficial. *Geologia de Engenharia*, A. M. S. Oliveira & S. N. A. Brito (eds.), Oficina de Textos, São Paulo, pp. 131-152.

INSTITUTO PEREIRA PASSOS (2005). Informações da cidade do rio de janeiro para subsidiar a câmara dos vereadores no processo de elaboração do plano diretor – 2005. Relatório, Secretaria Municipal de Urbanismo, Rio de Janeiro, RJ, 43 p.

KIM, S.K., HONG, W.P. & KIM, Y.M. (1991). Prediction of rainfall-triggered landslides in Korea. 6th International Symposium on Landslides, ISSMGE, Christchurch, New Zealand, 2: 989-994.

LARSEN, M.C & SIMON, A. (1993). Rainfall-threshold conditions for landslides in a humid-tropical system, Puerto Rico. *Geografiska Annaler*, 75A(1-2): 13-23.

LI, A. G., YUE, L. G. THAM, L. G., LEE, C. F. & LAW, K. T. (2005). Field-monitored variations of soil moisture and matric suction in a saprolite slope. *Canadian Geotechnical Journal*, 42(1): 13-26.

LUMB, P. (1975). Slope failures in Hong Kong. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 8(1): 31-35.

MARCELINO, E.V. (2007). Desastres naturais e geotecnologias: conceitos básicos. INPE, Santa Maria, RS, 20 p.

MATLAN, S. J. (2009). Back analysis of rainfall induced landslide in Sabah by Perisi Model. Thesis for the award of the degree of Master of Engineering, Universiti Teknologi Malaysia, Johor Bahru, Malaysia, 93 p.

MINISTÉRIO DA SAÚDE (2005). Reorganizando o SUS no município do Rio de Janeiro. Editora do Ministério da Saúde, Brasília, DF, 1 vol., 118 p.

MORENO, H.A., VÉLEZ, M.V., MONTOYA, J.D. & RHENALS, R.L. (2006). Rain and Landslides in Antioquia: Analysis of its Occurrence in Inter-annual, Intra-annual and Daily Scales (in Spanish), *Revista EIA*, 5: 59-69.

OLIVEIRA, L.C.D. (2004). Análise Quantitativa de Risco de Movimentos de Massa com Emprego de Estatística Bayesiana. Tese de Doutorado, COPPE, UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, 509 p.

ORTIGAO, J.A.R., JUSTI, M.G., D'ORSI, R. & BRITO, H. (2000). Rio-Watch 2001: the Rio de Janeiro landslide alarm system. 14th Southeast Asian Geotechnical Conference, SEAGS, Hong Kong, China, 3: 237-241.

PANDO, M.A, RUIZ, M.E. & LARSEN, M.C. (2004). Landslides in Puerto Rico produced by rains: overview (in Spanish). *Rev. Int. de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil*, 4(1): 53-66.

PEDROSA, M.G.A. (1994). *Análise de Correlações entre Pluviometria e Escorregamentos de Taludes*. Tese de Doutorado, COPPE, UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, 343 p.

PENHA, H. (2000a). Rochas e Solos do Rio de Janeiro. *Coleção Manual Técnico de Encostas*, J.A.R. Ortigão & A. Sayão (eds.) GEO-RIO, Rio de Janeiro, RJ, pp. 1-50.

PENHA, H. (2000b). Movimentos de massa. *Coleção Manual Técnico de Encostas*, J.A.R. Ortigão & A. Sayão (eds.) GEO-RIO, Rio de Janeiro, RJ, pp. 1-26.

PINA, M.F. & SANTOS, S.M. (2000). *Conceitos Básicos de Sistemas de Informação Geográfica e Cartografia Aplicados à Saúde*. OPAS, Brasília, 1 vol., 122 p.

PREMCHITT, J., BRAND, E.W. & PHILLIPSON, H.B. (1986). Landslides caused by rapid groundwater changes. *21st Annual Conference Engineering Group of Geological Society, GSL, Londres, Inglaterra*, 3: 87-94.

RAHARDJO, H., ONG, T.H., REZAUR, R.B. & LEONG, E.C. (2007). Factors Controlling Instability of Homogeneous Soil Slopes under Rainfall. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 133(12): 1532-1543.

REID, M.E. (1997). Slope instability caused by small variations in hydraulic conductivity. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 123(8): 717-725.

REIMER, E.S (2006). *Inventário dos movimentos de massa e análise da susceptibilidade aos escorregamentos rasos em solo no distrito de Cascatinha, Petrópolis, RJ*. Dissertação de Mestrado, UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, 125 p.

REIS, E., ZÊZERE, J.L., VIEIRA, G.T. & RODRIGUES, M.L. (2003). Integração de Dados Espaciais em SIG para Avaliação da Susceptibilidade à Ocorrência de Deslizamentos. *Finisterra*, XXXVIII (76): 3-34.

RIBEIRO, C.A.A.S., VARELLA, C.A.A., JÚNIOR, D.G.S. & SOARES, V.P. (2000). *Sistemas de Informações Geográficas. Agricultura de Precisão*, A. Borém, M. P. Giúdice, D. M. Queiroz, E. C. Mantovani, L. R. Ferreira, F. X. R. Valle & R. L. Gomide (eds.),UFV, Viçosa, MG, pp. 381-407.

SILVA, D.C.O. (2006). *Aplicação do Modelo Shalstab na Previsão de Deslizamentos em Petrópolis*. Dissertação de Mestrado, COPPE, UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, 132 p.

SOARES, A.C. (2003). *Diagnóstico e Modelagem da Rede de Distribuição de Derivados de Petróleo no Brasil*. Dissertação de Mestrado, PUC, Rio de Janeiro, RJ, 156 p.

SOARES, E.P. (2006). *Caracterização da precipitação na região de Angra dos Reis e a sua relação com a ocorrência de deslizamentos de encostas*. Dissertação de Mestrado, COPPE, UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, 145 p.

SOETERES, R. & WESTEN, C.J. (1996). Slope instability recognition, analysis and zonation. *Landslides: Investigation and Mitigation*, A. K. Turner & R. L. Schuster (eds.), National Academic Press, Washington, USA, pp. 129-177.

SOUZA, F.T. (2004). *Predição de Escorregamentos das Encostas do Município do Rio de Janeiro Através de Técnicas de Mineração de Dados*. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 108 p.

TATIZANA, C., OGURA, A.T., CERRI, L.E.S. & ROCHA, M.C.M. (1987a). Análise de Correlação entre Chuvas e Deslizamentos – Serra do Mar, município de Cubatão. 5° Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia, ABGE, São Paulo, Brasil, 2: 225-236.

TATIZANA, C., OGURA, A.T., CERRI, L.E.S. & ROCHA, M.C.M. (1987b). Modelamento numérico da análise de correlação entre chuvas e deslizamentos aplicado às encostas da Serra do Mar. 5° Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia, ABGE, São Paulo, Brasil, 2: 237-248.

TERLIEN, M.T.J. (1998). The determination of statistical and deterministic hydrological landslide-triggering thresholds. *Environmental Geology*, 35(2-3): 124-130.

TOLL, D.G., TSAPARAS, I. & RAHARDJO, H. (2001). The influence of rainfall sequences on negative pore-water pressures within slopes. 15th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. ICSMGE, Istanbul, Turkey, 2: 1269-1272.

TOSI, M. (2007). Root tensile strength relationships and their slope stability implications of three shrub species in the Northern Apennines (Italy). *Geomorphology*, 87(4): 268-283.

VARGAS JR., E., OLIVEIRA, A.R.B., COSTA FILHO, L.M. & CAMPOS, L.E.P. (1986). A study of the relationship between the stability of slopes in residual soils and rain intensity. *International Symposium on Environmental Geotechnology*, Envo Publishing, Leigh, USA, 1: 491-500.

VARNES, D.J. (1978). Slope movement types and processes. *Landslides, Analysis and Control*, R. L. Schuster & R. J. Krizek (eds), Transportation Research Board – Commission on Sociotechnical Systems – National Research Council, National Academy of Sciences, Washington, USA, pp. 11-33.

WANG, F.W. & SHIBATA, H. (2007). Influence of Soil Permeability on Rainfall-induced flowslides in Laboratory Flume Tests. *Canadian Geotechnical Journal*, 44(1): 1128-1136.

WANG, G & SASSA, K. (2003). Pore-pressure Generation and Movement of Rainfall-induced landslides: Effects of Grain Size and Fine-particle Content. *Engineering Geology*, 69: 109-125.

WANG, H.B. & SASSA, K. (2006). Rainfall-induced Landslide Hazard Assessment Using Artificial Neural Networks. *Earth Surface Processes and Landforms*, 31(2): 235-247.

WENG, C.K. (2009). Effect of layering on slope instability induced by rainfall. Project report for the award of the degree of Master of Engineering, Universiti Teknologi Malaysia, Johor Bahru, Malaysia, 88 p.

WIECZOREK, G.F. (1987). Effect of rainfall intensity and duration on debris flows in central Santa Cruz Mountains, California. Debris Flow/Avalanches: Process, Recognition and Mitigation, J.E. Costa & G.F. Wieczorek (eds.), Geological Society of America, Boulder, USA, pp. 93-104.

WIECZOREK, G.F., MORGAN, B.A. & CAMPBELL, R.H. (2000). Debris-flow hazards in the Blue Ridge of central Virginia. Environmental and Engineering Geoscience, 6(1): 3-23.

ZAPATA, T.A.G. (2010). Definition of Critical Thresholds of Rain as a Trigger Landslides in the Valle of Aburrá (in Spanish). Proyecto de grado, Universidad EAFIT, Medellín, 117 p.

APÊNDICE A – LISTA DE ACIDENTES

Tabela A.1 - Registros de deslizamentos com horário definido nos relatórios da Fundação Geo-Rio.

| Horário | Dia | Mês | Ano | Número do laudo | Estação |
|---------|-----|-----|------|-----------------|---------|
| 22:00 | 12 | 3 | 1998 | 219 | Irajá |
| 19:30 | 6 | 1 | 1999 | 55 | Irajá |
| 03:00 | 11 | 12 | 1999 | 680 | Irajá |
| 01:00 | 17 | 2 | 2000 | 192 | Irajá |
| 06:30 | 9 | 10 | 1998 | 268 | Irajá |
| 07:00 | 7 | 10 | 1998 | 313 | Irajá |
| 02:45 | 3 | 1 | 2000 | 27 | Irajá |
| 23:30 | 17 | 2 | 2000 | 218 | Irajá |
| 16:30 | 17 | 2 | 2000 | 336 | Irajá |
| 16:15 | 8 | 1 | 1998 | 26 | Penha |
| 01:00 | 16 | 1 | 1999 | 92 | Penha |
| 16:30 | 9 | 2 | 1999 | 171 | Penha |
| 19:00 | 25 | 1 | 2000 | 108 | Penha |
| 05:00 | 24 | 12 | 2001 | 115 | Penha |
| 16:00 | 23 | 7 | 2001 | 349 | Penha |
| 07:30 | 16 | 12 | 2001 | 537 | Penha |
| 05:40 | 24 | 12 | 2001 | 545 | Penha |
| 03:00 | 24 | 12 | 2001 | 574 | Penha |
| 03:00 | 24 | 12 | 2001 | 672 | Penha |
| 20:00 | 8 | 1 | 1998 | 74 | Penha |
| 22:00 | 12 | 3 | 1998 | 219 | Penha |
| 06:00 | 7 | 10 | 1998 | 272 | Penha |
| 06:30 | 7 | 10 | 1998 | 309 | Penha |
| 21:00 | 2 | 1 | 2000 | 2 | Penha |
| 03:00 | 3 | 1 | 2000 | 16 | Penha |
| 17:00 | 2 | 1 | 2000 | 66 | Penha |
| 19:00 | 1 | 1 | 2000 | 72 | Penha |
| 01:30 | 2 | 1 | 2000 | 97 | Penha |
| 11:00 | 2 | 1 | 2000 | 98 | Penha |
| 05:00 | 9 | 2 | 2000 | 245 | Penha |
| 01:00 | 17 | 2 | 2000 | 191 | Penha |
| 06:00 | 17 | 2 | 2000 | 224 | Penha |
| 03:00 | 17 | 2 | 2000 | 258 | Penha |
| 01:00 | 17 | 2 | 2000 | 335 | Penha |
| 23:00 | 18 | 3 | 2000 | 314 | Penha |
| 23:00 | 18 | 3 | 2000 | 333 | Penha |
| 11:00 | 20 | 3 | 2000 | 490 | Penha |
| 15:00 | 19 | 3 | 2000 | 535 | Penha |

| Horário | Dia | Mês | Ano | Número do laudo | Estação |
|---------|-----|-----|------|-----------------|---------|
| 07:00 | 16 | 12 | 2001 | 539 | Penha |
| 04:00 | 24 | 12 | 2001 | 579 | Penha |
| 03:00 | 24 | 12 | 2001 | 590 | Penha |
| 03:30 | 24 | 12 | 2001 | 588 | Penha |
| 04:00 | 24 | 12 | 2001 | 646 | Penha |
| 03:00 | 24 | 12 | 2001 | 589 | Penha |
| 01:00 | 24 | 12 | 2001 | 26 | Penha |
| 03:00 | 24 | 12 | 2001 | 574 | Penha |
| 17:40 | 15 | 1 | 1999 | 37 | Penha |
| 17:00 | 6 | 2 | 1999 | 151 | Penha |
| 21:00 | 9 | 2 | 1999 | 154 | Penha |
| 19:30 | 9 | 2 | 1999 | 153 | Penha |
| 22:00 | 12 | 12 | 1999 | 671 | Penha |
| 09:00 | 11 | 12 | 1999 | 681 | Penha |
| 20:00 | 8 | 1 | 1998 | 9 | Ilha |
| 17:30 | 8 | 1 | 1998 | 4 | Ilha |
| 04:30 | 11 | 2 | 1999 | 150 | Ilha |
| 19:00 | 23 | 3 | 1999 | 245 | Ilha |
| 01:00 | 27 | 1 | 2000 | 112 | Ilha |
| 17:30 | 8 | 1 | 1998 | 1 | Ilha |
| 01:00 | 2 | 1 | 2000 | 22 | Ilha |
| 20:30 | 17 | 2 | 2000 | 305 | Ilha |
| 06:00 | 24 | 12 | 2001 | 571 | Ilha |
| 08:00 | 24 | 12 | 2001 | 674 | Ilha |
| 09:45 | 26 | 12 | 2001 | 37 | Ilha |
| 08:35 | 24 | 12 | 2001 | 103 | Ilha |
| 00:01 | 23 | 12 | 2001 | 81 | Ilha |
| 20:00 | 7 | 1 | 1999 | 10 | Ilha |
| 03:00 | 12 | 2 | 1999 | 163 | Ilha |
| 19:00 | 23 | 3 | 1999 | 245 | Ilha |
| 23:30 | 3 | 10 | 1999 | 558 | Ilha |
| 16:30 | 8 | 1 | 1998 | 22 | Tanque |
| 08:00 | 7 | 10 | 1998 | 253 | Tanque |
| 02:00 | 19 | 2 | 2002 | 639 | Tanque |
| 22:00 | 8 | 1 | 1998 | 110 | Tanque |
| 01:00 | 24 | 12 | 2001 | 12 | Tanque |
| 04:00 | 5 | 10 | 1998 | 263 | Piedade |
| 06:45 | 13 | 3 | 1998 | 222 | Piedade |
| 16:00 | 3 | 1 | 2000 | 211 | Piedade |
| 00:15 | 17 | 2 | 2000 | 226 | Piedade |

| Horário | Dia | Mês | Ano | Número do laudo | Estação |
|---------|-----|-----|------|-----------------|---------|
| 23:00 | 16 | 2 | 2000 | 295 | Piedade |
| 20:00 | 24 | 12 | 2001 | 56 | Piedade |
| 18:00 | 25 | 12 | 2001 | 653 | Piedade |
| 22:00 | 3 | 1 | 2000 | 54 | Piedade |
| 23:00 | 16 | 2 | 2000 | 171 | Piedade |
| 00:01 | 17 | 2 | 2000 | 172 | Piedade |
| 23:45 | 16 | 2 | 2000 | 205 | Piedade |
| 23:30 | 16 | 2 | 2000 | 206 | Piedade |
| 00:15 | 17 | 2 | 2000 | 232 | Piedade |
| 08:20 | 4 | 9 | 2000 | 771 | Piedade |
| 23:00 | 30 | 11 | 2000 | 874 | Piedade |
| 06:00 | 24 | 12 | 2001 | 661 | Piedade |
| 06:00 | 24 | 12 | 2001 | 601 | Piedade |
| 22:00 | 24 | 12 | 2001 | 54 | Piedade |
| 23:00 | 24 | 12 | 2001 | 57 | Piedade |
| 03:00 | 9 | 1 | 1999 | 128 | Piedade |
| 04:00 | 15 | 11 | 1999 | 610 | Piedade |
| 02:30 | 21 | 7 | 2001 | 340 | Saúde |
| 16:00 | 1 | 10 | 1998 | 264 | Saúde |
| 22:00 | 17 | 2 | 2000 | 296 | Saúde |
| 22:00 | 10 | 3 | 2001 | 112 | Saúde |
| 11:30 | 16 | 12 | 2001 | 538 | Saúde |
| 05:00 | 24 | 12 | 2001 | 647 | Saúde |
| 02:00 | 24 | 12 | 2001 | 554 | Saúde |
| 19:30 | 8 | 1 | 1998 | 12 | Cidade |
| 21:45 | 8 | 1 | 1998 | 109 | Cidade |
| 22:30 | 8 | 1 | 1998 | 111 | Cidade |
| 17:00 | 10 | 1 | 1998 | 159 | Cidade |
| 22:00 | 18 | 6 | 2001 | 290 | Cidade |
| 19:00 | 8 | 1 | 1998 | 13 | Cidade |
| 18:00 | 8 | 1 | 1998 | 21 | Cidade |
| 02:00 | 3 | 1 | 2000 | 9 | Cidade |
| 04:00 | 3 | 1 | 2000 | 45 | Cidade |
| 05:30 | 5 | 10 | 1998 | 260 | Grajaú |
| 08:00 | 16 | 3 | 1998 | 224 | Grajaú |
| 22:00 | 17 | 2 | 1998 | 194 | Grajaú |
| 10:00 | 7 | 10 | 1998 | 250 | Grajaú |
| 01:30 | 12 | 3 | 1998 | 214 | Grajaú |
| 16:00 | 17 | 2 | 1998 | 195 | Grajaú |
| 20:30 | 19 | 2 | 1998 | 202 | Grajaú |

| Horário | Dia | Mês | Ano | Número do laudo | Estação |
|---------|-----|-----|------|-----------------|---------|
| 16:30 | 9 | 10 | 1998 | 249 | Grajaú |
| 23:00 | 16 | 2 | 2000 | 175 | Grajaú |
| 00:30 | 17 | 2 | 2000 | 186 | Grajaú |
| 00:30 | 17 | 2 | 2000 | 187 | Grajaú |
| 22:30 | 16 | 2 | 2000 | 225 | Grajaú |
| 22:30 | 24 | 12 | 2001 | 44 | Grajaú |
| 21:00 | 7 | 2 | 2001 | 143 | Grajaú |
| 22:00 | 24 | 12 | 2001 | 197 | Grajaú |
| 14:00 | 16 | 12 | 2001 | 531 | Grajaú |
| 05:00 | 24 | 12 | 2001 | 143,2 | Grajaú |
| 06:00 | 12 | 3 | 1998 | 212 | Grajaú |
| 03:00 | 12 | 3 | 1998 | 220 | Grajaú |
| 11:00 | 14 | 3 | 1998 | 221 | Grajaú |
| 09:00 | 7 | 10 | 1998 | 241 | Grajaú |
| 15:00 | 7 | 10 | 1998 | 297 | Grajaú |
| 13:00 | 4 | 1 | 2000 | 26 | Grajaú |
| 00:00 | 17 | 2 | 2000 | 174 | Grajaú |
| 01:00 | 17 | 2 | 2000 | 188 | Grajaú |
| 00:30 | 17 | 2 | 2000 | 189 | Grajaú |
| 01:30 | 17 | 2 | 2000 | 294 | Grajaú |
| 12:00 | 15 | 7 | 2000 | 634 | Grajaú |
| 10:00 | 27 | 11 | 2000 | 863 | Grajaú |
| 23:50 | 23 | 12 | 2001 | 609 | Grajaú |
| 22:00 | 24 | 12 | 2001 | 45 | Grajaú |
| 22:00 | 24 | 12 | 2001 | 58 | Grajaú |
| 02:00 | 21 | 6 | 1999 | 395 | Grajaú |
| 08:30 | 7 | 10 | 1998 | 270 | Tijuca |
| 22:00 | 17 | 2 | 1998 | 186 | Tijuca |
| 20:00 | 8 | 1 | 1998 | 136 | Tijuca |
| 17:00 | 17 | 2 | 1998 | 185 | Tijuca |
| 17:00 | 17 | 2 | 1998 | 200 | Tijuca |
| 08:00 | 7 | 10 | 1998 | 271 | Tijuca |
| 13:40 | 8 | 10 | 1998 | 302 | Tijuca |
| 13:00 | 4 | 1 | 2000 | 29 | Tijuca |
| 05:30 | 3 | 1 | 2000 | 123 | Tijuca |
| 11:40 | 17 | 2 | 2000 | 215 | Tijuca |
| 05:00 | 24 | 12 | 2001 | 660 | Tijuca |
| 02:00 | 24 | 12 | 2001 | 72 | Tijuca |
| 01:00 | 24 | 12 | 2001 | 73 | Tijuca |
| 17:00 | 11 | 2 | 1999 | 155 | Tijuca |

| Horário | Dia | Mês | Ano | Número do laudo | Estação |
|---------|-----|-----|------|-----------------|--------------|
| 01:00 | 12 | 2 | 1998 | 169 | Santa Teresa |
| 18:00 | 8 | 1 | 1998 | 68 | Santa Teresa |
| 19:30 | 19 | 2 | 1998 | 209 | Santa Teresa |
| 08:00 | 7 | 10 | 1998 | 240 | Santa Teresa |
| 13:00 | 2 | 10 | 1998 | 277 | Santa Teresa |
| 22:00 | 23 | 12 | 2001 | 550 | Santa Teresa |
| 05:00 | 24 | 12 | 2001 | 553 | Santa Teresa |
| 10:00 | 25 | 12 | 2001 | 649 | Santa Teresa |
| 15:00 | 8 | 1 | 1998 | 52 | Santa Teresa |
| 20:00 | 8 | 1 | 1998 | 60 | Santa Teresa |
| 12:30 | 15 | 2 | 1998 | 166 | Santa Teresa |
| 15:30 | 17 | 2 | 1998 | 197 | Santa Teresa |
| 21:00 | 24 | 12 | 2001 | 557 | Santa Teresa |
| 06:00 | 25 | 12 | 2001 | 578 | Santa Teresa |
| 12:30 | 25 | 12 | 2001 | 22 | Santa Teresa |
| 04:00 | 15 | 3 | 1999 | 230 | Santa Teresa |
| 13:40 | 8 | 10 | 1998 | 273 | Laranjeiras |
| 18:00 | 15 | 12 | 2002 | 683 | Laranjeiras |
| 17:00 | 14 | 5 | 2001 | 251 | Laranjeiras |
| 20:00 | 24 | 12 | 2001 | 654 | Laranjeiras |
| 21:00 | 24 | 12 | 2001 | 633 | Laranjeiras |
| 05:00 | 24 | 12 | 2001 | 7 | Laranjeiras |
| 21:00 | 24 | 12 | 2001 | 49 | Laranjeiras |
| 13:00 | 25 | 12 | 2001 | 28 | Laranjeiras |
| 19:00 | 12 | 2 | 1998 | 184 | Itanhangá |
| 05:00 | 7 | 10 | 1998 | 236 | Itanhangá |
| 06:00 | 7 | 10 | 1998 | 238 | Itanhangá |
| 02:00 | 5 | 10 | 1998 | 261 | Itanhangá |
| 09:00 | 24 | 12 | 2001 | 119 | Itanhangá |
| 17:00 | 5 | 10 | 1999 | 561 | Itanhangá |
| 02:00 | 5 | 10 | 1998 | 247 | Rocinha |
| 12:00 | 1 | 10 | 1998 | 293 | Rocinha |
| 06:00 | 5 | 10 | 1998 | 311 | Rocinha |
| 04:00 | 15 | 11 | 1999 | 603 | Rocinha |
| 12:00 | 1 | 12 | 2000 | 923 | Rocinha |
| 17:00 | 1 | 10 | 1998 | 243 | Rocinha |
| 07:10 | 7 | 10 | 1998 | 244 | Rocinha |
| 11:00 | 1 | 10 | 1998 | 246 | Rocinha |
| 02:00 | 5 | 10 | 1998 | 248 | Rocinha |
| 19:00 | 1 | 10 | 1998 | 251 | Rocinha |

| Horário | Dia | Mês | Ano | Número do laudo | Estação |
|---------|-----|-----|------|-----------------|------------|
| 18:00 | 1 | 10 | 1998 | 252 | Rocinha |
| 01:00 | 5 | 10 | 1998 | 254 | Rocinha |
| 23:00 | 4 | 10 | 1998 | 262 | Rocinha |
| 06:00 | 5 | 10 | 1998 | 311 | Rocinha |
| 13:00 | 1 | 12 | 2000 | 860 | Rocinha |
| 12:00 | 12 | 2 | 1998 | 175 | Copacabana |
| 04:00 | 12 | 2 | 1998 | 178 | Copacabana |
| 07:30 | 16 | 12 | 1998 | 342 | Copacabana |
| 16:00 | 8 | 1 | 1998 | 131 | Sumaré |
| 02:00 | 13 | 2 | 1998 | 167 | Sumaré |
| 22:00 | 12 | 2 | 1998 | 171 | Sumaré |
| 02:00 | 13 | 2 | 1998 | 168 | Sumaré |
| 22:00 | 12 | 2 | 1998 | 170 | Sumaré |
| 17:00 | 12 | 2 | 1998 | 183 | Sumaré |
| 15:30 | 17 | 2 | 1998 | 198 | Sumaré |
| 08:30 | 12 | 3 | 1998 | 217 | Sumaré |
| 02:00 | 12 | 3 | 1998 | 228 | Sumaré |
| 23:45 | 2 | 1 | 2000 | 4 | Sumaré |
| 06:00 | 1 | 12 | 2000 | 936 | Sumaré |
| 11:00 | 24 | 12 | 2001 | 591 | Sumaré |
| 09:00 | 24 | 12 | 2001 | 592 | Sumaré |
| 10:00 | 24 | 12 | 2001 | 593 | Sumaré |
| 05:00 | 24 | 12 | 2001 | 610 | Sumaré |
| 00:01 | 24 | 7 | 2000 | 686 | Anchieta |
| 18:00 | 1 | 1 | 2000 | 11 | Anchieta |
| 18:00 | 1 | 1 | 2000 | 30 | Anchieta |
| 10:00 | 20 | 3 | 2000 | 358 | Anchieta |
| 01:00 | 1 | 12 | 2000 | 879 | Anchieta |
| 03:40 | 24 | 12 | 2001 | 561 | Anchieta |
| 12:00 | 24 | 12 | 2001 | 170 | Anchieta |
| 19:15 | 6 | 1 | 1999 | 73 | Anchieta |
| 19:30 | 6 | 1 | 1999 | 72 | Anchieta |
| 20:00 | 9 | 2 | 1999 | 179 | Anchieta |
| 18:00 | 16 | 1 | 1999 | 115 | Madureira |
| 00:30 | 17 | 2 | 2000 | 185 | Madureira |
| 23:00 | 16 | 2 | 2000 | 229 | Madureira |
| 23:30 | 16 | 2 | 2000 | 247 | Madureira |
| 23:00 | 24 | 12 | 2001 | 48 | Madureira |
| 07:30 | 24 | 12 | 2001 | 556 | Madureira |
| 02:00 | 24 | 12 | 2001 | 644 | Madureira |

| Horário | Dia | Mês | Ano | Número do laudo | Estação |
|---------|-----|-----|------|-----------------|---------------|
| 02:00 | 24 | 12 | 2001 | 645 | Madureira |
| 16:00 | 8 | 1 | 1998 | 152 | Madureira |
| 06:03 | 16 | 3 | 1998 | 213 | Madureira |
| 09:40 | 7 | 10 | 1998 | 242 | Madureira |
| 06:30 | 7 | 10 | 1998 | 312 | Madureira |
| 10:30 | 3 | 1 | 2000 | 3 | Madureira |
| 22:00 | 2 | 1 | 2000 | 19 | Madureira |
| 19:00 | 25 | 1 | 2000 | 106 | Madureira |
| 19:45 | 31 | 1 | 2000 | 125 | Madureira |
| 01:30 | 17 | 2 | 2000 | 179 | Madureira |
| 00:30 | 17 | 2 | 2000 | 180 | Madureira |
| 00:30 | 17 | 2 | 2000 | 181 | Madureira |
| 01:30 | 17 | 2 | 2000 | 182 | Madureira |
| 00:30 | 17 | 2 | 2000 | 240 | Madureira |
| 00:30 | 17 | 2 | 2000 | 241 | Madureira |
| 00:40 | 17 | 2 | 2000 | 261 | Madureira |
| 23:30 | 17 | 2 | 2000 | 304 | Madureira |
| 00:30 | 17 | 2 | 2000 | 321 | Madureira |
| 03:00 | 24 | 12 | 2001 | 559 | Madureira |
| 22:00 | 24 | 12 | 2001 | 47 | Madureira |
| 01:00 | 24 | 12 | 2001 | 31 | Madureira |
| 22:00 | 24 | 12 | 2001 | 52 | Madureira |
| 23:00 | 24 | 12 | 2001 | 46 | Madureira |
| 17:30 | 6 | 1 | 1999 | 16 | Madureira |
| 15:00 | 6 | 1 | 1999 | 11 | Madureira |
| 06:00 | 14 | 11 | 1999 | 621 | Madureira |
| 10:00 | 14 | 11 | 1999 | 622 | Madureira |
| 06:00 | 14 | 11 | 1999 | 623 | Madureira |
| 10:30 | 13 | 3 | 1999 | 244 | São Cristóvão |
| 22:00 | 6 | 6 | 1999 | 352 | São Cristóvão |
| 23:30 | 6 | 9 | 2000 | 772 | São Cristóvão |
| 03:00 | 24 | 12 | 2001 | 144 | São Cristóvão |
| 03:00 | 24 | 12 | 2001 | 628 | São Cristóvão |
| 06:30 | 24 | 12 | 2001 | 623 | São Cristóvão |
| 21:00 | 9 | 6 | 1999 | 334 | Vidigal |
| 09:00 | 1 | 12 | 2000 | 903 | Vidigal |
| 01:00 | 5 | 10 | 1998 | 229 | Vidigal |
| 01:00 | 5 | 10 | 1998 | 230 | Vidigal |
| 01:00 | 5 | 10 | 1998 | 231 | Vidigal |
| 01:30 | 5 | 10 | 1998 | 232 | Vidigal |

| Horário | Dia | Mês | Ano | Número do laudo | Estação |
|---------|-----|-----|------|-----------------|-----------------|
| 02:00 | 5 | 10 | 1998 | 233 | Vidigal |
| 01:00 | 5 | 10 | 1998 | 234 | Vidigal |
| 02:00 | 5 | 10 | 1998 | 235 | Vidigal |
| 01:00 | 5 | 10 | 1998 | 314 | Vidigal |
| 05:00 | 3 | 1 | 2000 | 96 | Vidigal |
| 05:00 | 3 | 1 | 2000 | 100 | Vidigal |
| 23:30 | 16 | 2 | 2000 | 219 | Cachambi |
| 02:00 | 19 | 3 | 2000 | 342 | Cachambi |
| 08:00 | 12 | 3 | 1998 | 223 | Cachambi |
| 09:10 | 18 | 7 | 2000 | 664 | Cachambi |
| 22:00 | 28 | 3 | 2001 | 172 | Cachambi |
| 02:00 | 9 | 1 | 1999 | 58 | Cachambi |
| 12:30 | 23 | 7 | 2001 | 341 | Urca |
| 20:00 | 8 | 1 | 1998 | 83 | Urca |
| 05:40 | 7 | 10 | 1998 | 259 | Urca |
| 04:00 | 3 | 1 | 2000 | 15 | Urca |
| 05:00 | 24 | 12 | 2001 | 634 | Urca |
| 22:00 | 19 | 3 | 1998 | 225 | Jardim Botânico |
| 18:00 | 15 | 12 | 1998 | 344 | Jardim Botânico |
| 11:00 | 25 | 7 | 2000 | 622 | Jardim Botânico |

Tabela A.2 - Registros de deslizamentos com horários estimados (horários sob o formato de minutos decorridos a partir da meia-noite do dia de ocorrência do acidente).

| Horário estimado | Dia | Mês | Ano | Número do laudo | Estação |
|------------------|-----|-----|------|-----------------|---------|
| 1374 | 16 | 2 | 2000 | 216 | Irajá |
| 9 | 17 | 2 | 2000 | 250 | Irajá |
| 9 | 17 | 2 | 2000 | 271 | Irajá |
| 9 | 17 | 2 | 2000 | 327 | Irajá |
| 1089 | 8 | 1 | 1999 | 28 | Irajá |
| 1232 | 11 | 2 | 1998 | 172 | Penha |
| 17 | 18 | 2 | 1998 | 196 | Penha |
| 1097 | 19 | 2 | 1998 | 203 | Penha |
| 2 | 3 | 1 | 2000 | 67 | Penha |
| 2 | 17 | 2 | 2000 | 201 | Penha |
| 632 | 17 | 2 | 2000 | 285 | Penha |
| 1382 | 16 | 2 | 2000 | 288 | Penha |
| 2 | 17 | 2 | 2000 | 301 | Penha |
| 1412 | 18 | 3 | 2000 | 334 | Penha |
| 0 | 21 | 3 | 2000 | 414 | Penha |

| Horário estimado | Dia | Mês | Ano | Número do laudo | Estação |
|------------------|-----|-----|------|-----------------|---------|
| 977 | 1 | 12 | 2000 | 910 | Penha |
| 0 | 25 | 12 | 2001 | 177 | Penha |
| 92 | 16 | 12 | 2001 | 569 | Penha |
| 137 | 24 | 12 | 2001 | 599 | Penha |
| 1382 | 16 | 2 | 2000 | 486 | Penha |
| 137 | 24 | 12 | 2001 | 624 | Penha |
| 152 | 9 | 1 | 1999 | 21 | Penha |
| 1127 | 16 | 1 | 1999 | 105 | Penha |
| 1290 | 14 | 3 | 1998 | 218 | Ilha |
| 975 | 8 | 1 | 1998 | 87 | Ilha |
| 1290 | 10 | 2 | 1999 | 164 | Ilha |
| 1215 | 16 | 2 | 2000 | 238 | Ilha |
| 300 | 24 | 12 | 2001 | 580 | Ilha |
| 1080 | 8 | 1 | 1999 | 117 | Ilha |
| 867 | 8 | 1 | 1998 | 98 | Tanque |
| 867 | 8 | 1 | 1998 | 161 | Tanque |
| 1077 | 15 | 1 | 1999 | 66 | Tanque |
| 87 | 24 | 12 | 2001 | 116 | Tanque |
| 0 | 27 | 12 | 2001 | 206 | Tanque |
| 1171 | 17 | 2 | 1998 | 187 | Piedade |
| 16 | 18 | 2 | 1998 | 193 | Piedade |
| 871 | 16 | 1 | 1999 | 44 | Piedade |
| 1336 | 10 | 2 | 1999 | 169 | Piedade |
| 91 | 24 | 12 | 2001 | 133 | Piedade |
| 1396 | 16 | 2 | 2000 | 204 | Piedade |
| 1 | 16 | 12 | 2001 | 658 | Piedade |
| 16 | 18 | 2 | 1998 | 189 | Saúde |
| 1096 | 31 | 1 | 2000 | 148 | Saúde |
| 1121 | 12 | 2 | 1998 | 174 | Cidade |
| 1076 | 15 | 1 | 1999 | 82 | Cidade |
| 71 | 24 | 12 | 2001 | 24 | Cidade |
| 71 | 24 | 12 | 2001 | 285 | Cidade |
| 1306 | 28 | 3 | 2001 | 150 | Grajaú |
| 1306 | 28 | 3 | 2001 | 152 | Grajaú |
| 960 | 8 | 1 | 1998 | 65 | Tijuca |
| 960 | 8 | 1 | 1998 | 95 | Tijuca |
| 285 | 24 | 12 | 2001 | 577 | Tijuca |
| 30 | 17 | 2 | 2000 | 287 | Tijuca |
| 1095 | 4 | 9 | 2000 | 721 | Tijuca |
| 1335 | 23 | 12 | 2001 | 581 | Tijuca |

| Horário estimado | Dia | Mês | Ano | Número do laudo | Estação |
|------------------|-----|-----|------|-----------------|---------------|
| 1050 | 18 | 2 | 1998 | 192 | Santa Teresa |
| 960 | 8 | 1 | 1998 | 28 | Santa Teresa |
| 960 | 8 | 1 | 1998 | 102 | Santa Teresa |
| 960 | 8 | 1 | 1998 | 145 | Santa Teresa |
| 1050 | 18 | 2 | 1998 | 191 | Santa Teresa |
| 900 | 17 | 2 | 1998 | 199 | Santa Teresa |
| 1110 | 19 | 2 | 1998 | 205 | Santa Teresa |
| 1110 | 19 | 2 | 1998 | 210 | Santa Teresa |
| 1305 | 3 | 9 | 2000 | 722 | Santa Teresa |
| 285 | 24 | 12 | 2001 | 107 | Santa Teresa |
| 150 | 16 | 12 | 2001 | 540 | Santa Teresa |
| 285 | 24 | 12 | 2001 | 562 | Santa Teresa |
| 285 | 24 | 12 | 2001 | 564 | Santa Teresa |
| noite | 30 | 9 | 1998 | 276 | Santa Teresa |
| 1365 | 24 | 12 | 2001 | 572 | Santa Teresa |
| 285 | 24 | 12 | 2001 | 611 | Santa Teresa |
| 285 | 8 | 1 | 1998 | 94 | Laranjeiras |
| 900 | 17 | 2 | 1998 | 188 | Laranjeiras |
| 1155 | 7 | 2 | 1999 | 193 | Laranjeiras |
| 0 | 12 | 12 | 1999 | 702 | Laranjeiras |
| 1309 | 28 | 3 | 2001 | 151 | Laranjeiras |
| 289 | 24 | 12 | 2001 | 629 | Laranjeiras |
| 858 | 8 | 1 | 1998 | 70 | Rocinha |
| 259 | 24 | 12 | 2001 | 583 | Copacabana |
| 259 | 24 | 12 | 2001 | 584 | Copacabana |
| 1133 | 8 | 1 | 1998 | 29 | Anchieta |
| 128 | 2 | 9 | 2000 | 751 | Anchieta |
| 1268 | 28 | 3 | 2001 | 158 | Anchieta |
| 1082 | 6 | 1 | 1999 | 6 | Madureira |
| 0 | 8 | 1 | 1999 | 30 | Madureira |
| 857 | 16 | 1 | 1999 | 36 | Madureira |
| 0 | 8 | 1 | 1999 | 80 | Madureira |
| 1217 | 15 | 1 | 1999 | 85 | Madureira |
| 0 | 25 | 12 | 2001 | 667 | Madureira |
| 1337 | 16 | 2 | 2000 | 246 | Madureira |
| 2 | 17 | 2 | 2000 | 356 | Madureira |
| 1337 | 16 | 2 | 2000 | 367 | Madureira |
| 32 | 16 | 12 | 2001 | 605 | Madureira |
| 542 | 4 | 1 | 2000 | 6 | São Cristóvão |
| 288 | 24 | 12 | 2001 | 582 | Vidigal |

| Horário estimado | Dia | Mês | Ano | Número do laudo | Estação |
|------------------|-----|-----|------|-----------------|-----------------|
| 273 | 24 | 12 | 2001 | 641 | Urca |
| 949 | 8 | 1 | 1998 | 113 | Jardim Botânico |
| 0 | 5 | 1 | 2000 | 134 | Jardim Botânico |
| 439 | 24 | 12 | 2001 | 555 | Jardim Botânico |