



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

INPE-12146-TDI/970

**MAPEAMENTO DE ÁREAS SUSCEPTÍVEIS A
ESCORREGAMENTO NO MUNICÍPIO DE CARAGUATATUBA
(SP) USANDO TÉCNICAS DE SENSORIAMENTO REMOTO**

Emerson Vieira Marcelino

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto,
orientada pelo Dr. Antônio Roberto Formaggio, aprovada em 26 de setembro de 2003

528.711.7

MARCELINO, E. V.

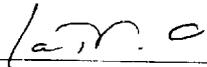
Mapeamento de áreas susceptíveis a escorregamentos no município de Caraguatatuba (SP) usando técnicas de sensoriamento remoto / E. V. Marcelino. – São José dos Campos: 2003.

228p. – (INPE-12146-TDI/970).

1.Escorregamentos. 2.Fusão de dados. 3.Mapeamento temático. Sensoriamento remoto. 4.Sistemas de Informação Geográfica (SIG). 5.Brasil. 6.Caraguatatuba (SP). I.Título.

Aprovado pela Banca Examinadora em cumprimento a requisito exigido para a obtenção do Título de **Mestre em Sensoriamento Remoto**.

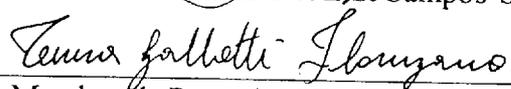
Dr^a Leila Maria Garcia Fonseca


Presidente/INPE, SJCampos-SP

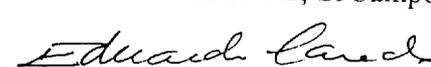
Dr. Antonio Roberto Formaggio


Orientador/INPE, SJCampos-SP

Dr^a Tereza Gallotti Florenzano

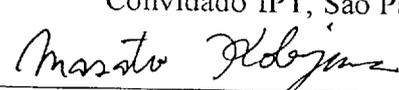

Membro da Banca/INPE, SJCampos-SP

Dr. Eduardo Soares de Macedo



Membro da Banca
Convidado IPT, São Paulo-SP

Dr. Masato Kobiyama



Membro da Banca
Convidado UFSC, Florianópolis-SC

Candidato: Emerson Vieira Marcelino

São José dos Campos, 26 de setembro de 2003.

“Porque o Senhor dá a sabedoria; da sua boca procedem o conhecimento e o entendimento; ele reserva a verdadeira sabedoria para os retos; e escudo para os que caminham em integridade, guardando-lhes as veredas da justiça, e preservando o caminho dos seus santos.

Então entenderás a retidão, a justiça, a equidade, e todas as boas veredas. Pois a sabedoria entrará no teu coração, e o conhecimento será aprazível à tua alma; o bom siso te protegerá, e o discernimento te guardará;”

Provérbios 2: 6-11

*Dedico a **Jesus Cristo**, meu senhor e salvador,
e a meus pais,
Lourival e Maurina Marcelino,
que têm sido uma grande fonte de motivação, fé e amor.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, pai amado, pelas condições físicas e emocionais que me sustentaram nesta árdua caminhada.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Antônio Roberto Formaggio, pela confiança, disponibilidade e direcionamento, fundamentais para a realização da presente pesquisa. Além disso, agradeço-o pela amizade e conselhos que foram além do saber científico.

À Prof.^a Dr.^a Maria Lúcia de Paula Herrmann, amiga, conselheira e grande incentivadora nos estudos sobre desastres naturais.

À Prof.^a Dr.^a Telma Krug, pelo carinho, incentivo e palavras que irão me acompanhar pelo resto da vida.

Aos Drs. Edson Crepani e Simeão Medeiros pela gentileza em ceder o banco de dados geográficos da área de estudo.

Ao Msc. Fernando Ventura, pela amizade e auxílio na aplicação das técnicas de fusão de imagens de satélite.

Ao Msc. Fábio Roque da Silva, pela amizade e auxílio na aplicação das técnicas de inferências geográficas.

Ao Msc. Marcelo Francisco Sestini, pela amizade e pelos dados e informações que muito contribuíram para o desenvolvimento desta pesquisa.

Ao Msc. Dmitri Fedorov, grande amigo, que tanto ajudou na resolução dos problemas computacionais que surgiram ao longo deste trabalho.

Ao doutorando Roberto P. Souto, pela amizade e pela gentileza em ceder sua sala de estudos que me propiciou condições excelentes de trabalho.

Ao doutorando José Marinaldo Gleriani, grande amigo enviado por Deus, pelo constante apoio e disponibilidade ao longo desta jornada.

Ao Msc. Paulo Ubaldino de Souza, pela amizade e pelo auxílio computacional (F1) durante a realização da presente pesquisa.

Aos meus amigos e companheiros de luta, Morris Scherer-Warren, Fernando Del Bom Espírito-Santo, Marcus Adami, Eduardo da Silva Pinheiro e Clério Lemos de Souza, que tornaram esta caminhada mais fácil e divertida.

A todos os colegas da pós-graduação, em especial a turma SR2001, pelo companherismo ao longo desta histórica jornada.

Aos professores e pesquisadores do INPE, em especial aos Prof. Drs. Nelson Jesus Ferreira, João Viane Soares, Hermann Kux e Tereza Florenzano, pela amizade e apoio constante que foram fundamentais para a realização deste mestrado.

Às secretárias e estagiárias da OBT, em especial à Maria Etelvina (Etel), Maria Cristina e Angelucci Rodrigues, sempre sorridentes e disponíveis em ajudar.

Ao casal Robson e Amanda, verdadeiros irmãos em Cristo, que dividiram tudo o que tinham nos momentos de necessidade.

Aos queridos amigos Elcio Hideiti Shiguemori e Ana Paula de Castro, pela ajuda, carinho e companherismo durante esta caminhada.

Ao Grupo de Estudo Bíblico e Oração do INPE, em especial a Magner Fernandes da Costa e família, pelas orações e auxílio nas horas difíceis.

A minha amada esposa Isabela P. Viana de Oliveira Marcelino, serva de Deus e mulher virtuosa, pela constante expressão de amor, fé e carinho em minha vida.

Aos meus sogros, Carlos Alberto e Wilma Regina, pelo carinho, apoio e auxílio constante.

À minha querida irmã Maclene Marcelino da Conceição e aos meus cunhados Laércio da Conceição, Fernanda P. V. de Oliveira e Luis André e Patrícia de Oliveira, pelo carinho e torcida.

Aos membros da banca, Profa. Dra. Leila Fonseca, Prof. Dr. Masato Kobiyama e Dr. Eduardo Soares Macedo.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa de mestrado.

Ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), pelo privilégio de ter cursado o mestrado em sensoriamento remoto.

RESUMO

Este trabalho teve como objetivo o desenvolvimento de uma abordagem quantitativa para a elaboração de mapeamento de áreas susceptíveis a escorregamentos, utilizando técnicas de sensoriamento remoto e SIG. Buscou-se selecionar a técnica de fusão de imagens ópticas orbitais mais adequada para a identificação de cicatrizes de escorregamentos e a técnica de inferência geográfica que gerasse o mapa de susceptibilidade a escorregamentos mais preciso. A área de estudo selecionada para a avaliação da metodologia foi o município de Caraguatatuba, localizado no Litoral Norte do Estado de São Paulo, em virtude dos eventos catastróficos ocorridos no mesmo e da existência de um banco de dados geográficos adequado para esta pesquisa. Além destes dados utilizaram-se bandas 3, 4, 5 e pancromática do sensor ETM+ do satélite Landsat 7 e pancromática do sensor HRV do satélite Spot 4. Inicialmente, foi realizada uma avaliação cartográfica do banco de dados para a definição da escala de trabalho. O RMSE encontrado na avaliação foi de 43,12m, o que possibilitou realizar mapeamento em escala igual ou inferior a 1:100.000. Para a elaboração do mapa de inventário foi realizada uma avaliação da qualidade espacial, espectral e potencial fotointerpretativo das imagens fundidas pelos métodos Brovey, HSV, PCA, IHS, WTVE e WTYO. As fusões foram realizadas entre as bandas PAN HRV e 453 ETM+ (HRV/ETM) e entre as bandas PAN ETM+ e 453 ETM+ (ETM/ETM). Com base nas avaliações realizadas, concluiu-se que a fusão IHS, das imagens HRV/ETM, foi a que melhor preservou as informações espaciais e espectrais das imagens originais, sendo então utilizada para a identificação das cicatrizes de escorregamentos. Utilizando o classificador Maxver e analisando visualmente a imagem IHS foi possível identificar 497 cicatrizes, sendo que, 397 foram utilizadas na ponderação das variáveis geoambientais e suas respectivas classes e 100 foram utilizadas para a avaliação dos mapas de susceptibilidade. As técnicas de inferência geográficas aplicadas nesta pesquisa foram: Booleana, Média Ponderada, AHP e Probabilidade Condicional. Destas técnicas, a que apresentou o pior resultado foi a Booleana, em virtude da excessiva generalização das áreas favoráveis a escorregamentos. Para as técnicas Média Ponderada e AHP, verificou-se grande similaridade nos resultados, principalmente na classe Muito Alta de susceptibilidade, que obteve uma correlação de 62% para as duas referidas técnicas. A Probabilidade Condicional foi a técnica que apresentou o melhor resultado, com destaque para a correlação de 95% para a classe Muito Alta. Através deste método, concluiu-se que as áreas mais susceptíveis a escorregamentos na área de estudo estão localizadas nas médias encostas da Serra do Mar, em virtude da elevada declividade e da presença de solos rasos (Cambissolos).

LANDSLIDE SUSCEPTIBILITY MAPPING IN CARAGUATATUBA (SP) MUNICIPALITY USING REMOTE SENSING AND GIS TECHNIQUES

ABSTRACT

The objective of the present research was the development of a quantitative approach for landslide susceptibility mapping using remote sensing and GIS techniques. In order to determine the best products for identifying landslide scars, six imagery fusion techniques (Brovey, HSV, PCA, IHS and two Wavelets) were evaluated and many geographical inference approaches were applied to obtain the landslide susceptibility map. The study area was Caraguatatuba municipality, São Paulo, Brazil, due to relatively recent catastrophic events of landslide that occurred there. ETM+ Landsat 7 (multispectral and PAN) and HRV Spot 4 (PAN) data were used for obtaining maps in the 1:100,000 scale. IHS fusion was the technique that better preserved the spatial/spectral quality and the photointerpretative potential from the studied imagery and thus it was used for identifying landslide scars of the study area. By Maxver classification and visual analysis a total of 497 landslide scars were mapped. From this total, 397 scars were utilized for ponder the environmental variables and thematic classes considered; the remaining 100 scars were kept apart for the validation phase of the obtained susceptibility maps. Boolean, Index Overlay, AHP and Conditional Probability were the used techniques of geographical inference. Boolean technique provided the worst result due the excessive generalization of the favorable areas of landsliding. Index Overlay and AHP provided intermediate similar results, mainly for the class Very High susceptibility of landslides ($r^2 = 62\%$). Conditional Probability was the better approach, providing a correlation of 95% for the Very High susceptibility class. Because their high slopes and shallow soils (Inceptisols), Serra-do-Mar medium hillsides were the more susceptible areas for the occurrence of landslides events.

SUMÁRIO

	Pág.
LISTA DE FIGURAS	
LISTA DE TABELAS	
LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS	
CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO.....	27
1.1 Objetivo.....	29
1.2 Justificativa.....	30
CAPÍTULO 2 – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	33
2.1 Desastres naturais.....	33
2.2 Movimentos de massa.....	36
2.3 Classificação de movimentos de massa.....	44
2.4 Tipos de mapeamentos de áreas propensas a escorregamentos.....	49
2.4.1 Mapa de inventário.....	50
2.4.2 Mapa de susceptibilidade.....	50
2.4.3 Mapa de risco.....	52
2.5 Métodos de mapeamento de áreas susceptíveis.....	53
2.5.1 Método heurístico.....	53
2.5.2 Método determinístico.....	54
2.5.3 Método estatístico.....	55
2.6 A participação do Sensoriamento Remoto e do Sistema de Informação Geográfica na elaboração de mapas de susceptibilidade.....	56
2.6.1 Sensoriamento Remoto.....	57
2.6.1.1 Técnicas de fusão de imagens.....	59
2.6.2 Sistema de Informação Geográfica.....	68
2.6.2.1 Técnicas de inferência geográfica.....	68
CAPÍTULO 3 – ÁREA DE ESTUDO.....	79
3.1 Localização.....	79
3.2 Caracterização geoambiental.....	80
3.2.1 Clima da área de estudo.....	83
CAPÍTULO 4 – MATERIAIS E MÉTODOS.....	85
4.1 Materiais.....	85
4.1.1 Dados cartográficos.....	85
4.1.2 Dados de sensoriamento remoto.....	86
4.1.3 Equipamentos e softwares.....	87
4.1.3.1 Equipamentos.....	87

4.1.3.2	Softwares.....	87
4.2	Métodos.....	87
4.2.1	Avaliação da precisão cartográfica do banco de dados geográficos.....	89
4.2.2	Seleção das bandas multiespectrais para a identificação de escorregamentos.....	91
4.2.3	Seleção de área teste para avaliação dos métodos de fusão de imagens...	94
4.2.4	Uniformização radiométrica.....	95
4.2.5	Reamostragem das imagens multiespectrais.....	99
4.2.6	Avaliação dos métodos de fusão.....	99
4.2.6.1	Avaliação da qualidade espacial.....	99
4.2.6.2	Avaliação da qualidade espectral.....	100
4.2.6.3	Avaliação visual.....	103
4.2.7	Confecção dos mapas temáticos.....	104
4.2.7.1	Elaboração do mapa de inventário de escorregamentos.....	104
4.2.7.2	Modelo Numérico do Terreno (MNT).....	108
4.2.7.3	Mapa Hipsométrico.....	109
4.2.7.4	Mapa de Declividade.....	110
4.2.7.5	Mapa de Orientação das encostas.....	111
4.2.7.6	Mapas de Distâncias (<i>Buffers</i>).....	111
4.2.8	Tabulação cruzada.....	111
4.2.9	Elaboração dos mapas de susceptibilidade a escorregamentos.....	112
4.2.9.1	Método Booleano.....	112
4.2.9.2	Método Média Ponderada.....	113
4.2.9.3	Método AHP.....	114
4.2.9.4	Método Probabilidade Condicional.....	115
CAPÍTULO 5 – RESULTADOS E DISCUSSÃO.....		119
5.1	Avaliação cartográfica.....	119
5.2	Métodos de fusão para a identificação de escorregamentos.....	123
5.2.1	Avaliação espacial dos métodos de fusão.....	123
5.2.1.1	HRV/ETM.....	123
5.2.1.2	ETM/ETM.....	125
5.2.1.3	Síntese da avaliação espacial.....	127
5.2.2	Avaliação espectral dos métodos de fusão.....	128
5.2.2.1	HRV/ETM.....	128
5.2.2.2	ETM/ETM.....	131
5.2.2.3	Síntese da avaliação espectral.....	133
5.2.3	Avaliação visual dos métodos de fusão.....	134
5.2.4	Síntese dos processos de avaliação dos métodos de fusão.....	135
5.3	Mapa de inventário.....	138
5.4	Correlação entre os escorregamentos e os parâmetros geoambientais.....	145
5.4.1	Correlação entre hipsometria e escorregamentos.....	145
5.4.2	Correlação entre declividade e escorregamentos.....	149
5.4.3	Correlação entre orientação das encostas e escorregamentos.....	152
5.4.4	Correlação entre distâncias de rios e escorregamentos.....	155

5.4.5	Correlação entre distâncias de estradas e de lineamentos e escorregamentos.....	158
5.4.6	Correlação entre geologia e escorregamentos.....	163
5.4.7	Correlação entre pedologia e escorregamentos.....	166
5.4.8	Correlação entre uso e cobertura da terra e escorregamentos.....	169
5.4.9	Síntese da influência dos parâmetros geoambientais sobre a ocorrência de escorregamentos no município de Caraguatatuba.....	173
5.5	Análise dos métodos de mapeamento de áreas susceptíveis a escorregamentos.....	174
5.5.1	Método Booleano.....	174
5.5.2	Método Média Ponderada.....	177
5.5.3	Método AHP.....	181
5.5.4	Método Probabilidade Condicional.....	184
5.5.5	Análise comparativa do métodos de mapeamento de áreas susceptíveis a escorregamentos.....	187
CAPÍTULO 6 – CONCLUSÕES.....		191
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....		195
APÊNDICE A – PROGRAMAS ELABORADOS EM LEGAL.....		207
APÊNDICE B – IMAGENS SINTÉTICAS RESULTANTES DAS FUSÕES REALIZADAS PARA O CASO HRV/ETM.....		221
APÊNDICE C – IMAGENS SINTÉTICAS RESULTANTES DAS FUSÕES REALIZADAS PARA O CASO ETM/ETM.....		225

LISTA DE FIGURAS

2.1	- Relação conceitual entre risco, perigo e desastre.....	35
2.2	- Classificação de movimentos de massa.....	45
2.3	- Rastejo (<i>creep</i>).....	46
2.4	- Escorregamento rotacional (<i>slump</i>).....	47
2.5	- Escorregamento translacional (<i>translational landslide</i>).....	47
2.6	- Corrida de lama (<i>earthflow</i>).....	48
2.7	- Quedas (<i>falls</i>).....	49
2.8	- Características típicas de um escorregamento.....	58
2.9	- Seqüência simplificada do método de fusão IHS.....	62
2.10	- Seqüência simplificada do método de fusão PCA.....	63
2.11	- Método WT proposto por Garguet-Duport.....	64
2.12	- Seqüência simplificada do método WT proposto por Ventura (2002).....	66
2.13	- Exemplo de fusão WT: (A) banda PAN HRV, (B) composição 453 TM e (C) fusão WT realizada pelo método Ventura (2002).....	67
2.14	- Diagrama de Venn mostrando os resultados da aplicação da lógica Booleana para a união e intersecção de dois ou mais conjuntos.....	69
2.15	- Tabulação cruzada e probabilidade condicional para o exemplo fornecido por Bonham-Carter (1997).....	75
3.1	- Localização da área de estudo sobre uma composição colorida 453 ETM+/Landsat.....	79
4.1	- Fluxograma da primeira etapa de trabalho.....	88
4.2	- Fluxograma da segunda etapa de trabalho.....	89
4.3	- Localização e distribuição dos pontos de teste para a avaliação cartográfica do banco de dados geográficos.....	90
4.4	- Comportamento espectral de alvos e bandas do sensor ETM.....	93
4.5	- Área teste para avaliação dos métodos de fusão.....	95
4.6	- Exemplo de imagem PAN HRV filtrada com filtro Laplaciano.....	100
4.7	- Exemplo de distância euclidiana entre a média das bandas originais e a média das bandas sintéticas de três métodos de fusão.....	102
4.8	- Exemplo de planilha utilizada no processo de avaliação visual.....	103
4.9	- Exemplo de grade regular.....	109
5.1	- Distribuição dos pontos de teste e arruamentos extraídos da base cartográfica.....	121
5.2	- Erro de posicionamento para cada ponto de teste.....	122
5.3	- Avaliação espacial da fusão HRV/ETM.....	124
5.4	- Influência dos erros de registro no processo de fusão.....	125
5.5	- Avaliação espacial da fusão ETM/ETM.....	126
5.6	- Comparação dos erros de registro obtidos com as fusões de imagens HRV/ETM (a) e ETM/ETM (b).....	127
5.7	- Distância euclidiana da média e desvio padrão para a avaliação espectral dos diferentes métodos de fusão para o caso HRV/ETM.....	130
5.8	- Distância euclidiana do CV para a avaliação espectral dos diferentes métodos de fusão para o caso HRV/ETM.....	130

5.9	- Distância euclidiana da média e desvio padrão para a avaliação espectral dos diferentes métodos de fusão para o caso ETM/ETM.....	131
5.10	- Distância euclidiana do CV para a avaliação espectral dos diferentes métodos de fusão para o caso ETM/ETM.....	133
5.11	- Resultado da avaliação visual dos seis métodos de fusão - HRV/ETM.....	134
5.12	- Resultado final da avaliação dos métodos de fusão – HRV/ETM.....	135
5.13	- Escorregamentos destacadas pelo método IHS para o caso HRV/ETM.....	136
5.14	- Exemplos de escorregamentos possíveis de serem identificadas na imagem híbrida IHS (HRV/ETM).....	137
5.15	- Similaridade espectral entre as cicatrizes de escorregamento (a) e as áreas de pastagens no (b) planalto e na (c) planície litorânea.....	141
5.16	- Escorregamentos com rocha exposta (A), samambaia-das-taperas (B) e gramíneas (C).....	142
5.17	- Escorregamentos ao longo da Rodovia dos Tamoios: (A) em 1967 com solo exposto e (B) em 2002 coberta por gramíneas e vegetação herbácea.....	142
5.18	- Mapa de inventário de escorregamentos.....	144
5.19	- Correlação entre classes de hipsometria e frequência de escorregamentos.....	146
5.20	- Mapa hipsométrico.....	148
5.21	- Correlação entre classes de declividade e frequência de escorregamentos.....	150
5.22	- Mapa de declividade.....	151
5.23	- Correlação entre classes de orientação das encostas e frequência de escorregamentos.....	153
5.24	- Mapa de orientação de encostas.....	154
5.25	- Correlação entre classes de distância de rios e frequência de escorregamentos.....	156
5.26	- Mapa de distancia de rios.....	157
5.27	- Correlação entre classes de distância de estradas e frequência de escorregamentos.....	159
5.28	- Correlação entre classes distâncias de lineamentos e frequência de escorregamentos.....	160
5.29	- Mapa de distancias de estradas.....	161
5.30	- Mapa de distâncias de lineamentos.....	162
5.31	- Correlação entre classes de geologia e frequência de escorregamentos.....	163
5.32	- Mapa de geológico.....	165
5.33	- Correlação entre classes de pedologia e frequência de escorregamentos.....	167
5.34	- Mapa de pedológico.....	168
5.35	- Correlação entre classes de uso e cobertura da terra e frequência de escorregamentos.....	171
5.36	- Mapa de uso e cobertura da terra.....	172
5.37	- Mapa de susceptibilidade a escorregamentos realizado pelo método Booleano.....	176
5.38	- Mapa de susceptibilidade a escorregamentos realizado pelo método Média Ponderada.....	178

5.39 - Áreas classificadas erroneamente na planície litorânea.....	179
5.40 - Áreas classificadas erroneamente nas proximidades da Rodovia Tamoios.....	180
5.41 - Áreas classificadas erroneamente no planalto.....	180
5.42 - Mapa de susceptibilidade a escorregamentos realizado pelo método AHP.....	183
5.43 - Mapa de susceptibilidade a escorregamentos realizado pelo método Probabilidade Condicional.....	186
5.44 - Comparação entre os métodos Média Ponderada, AHP e Probabilidade Condicional com relação a frequência de escorregamentos.....	187
5.45 - Correlação entre os métodos Média Ponderada, AHP e Probabilidade Condicional com relação a área das classes de susceptibilidade.....	188

LISTA DE TABELAS

1.1	- Principais escorregamentos ocorridos no Brasil (1928 – 2001).....	31
2.1	- Desastres naturais ocorridos no mundo (1947-1989).....	34
2.2	- Relação entre resolução espacial e tamanho de cicatrizes de escorregamentos passíveis de serem identificadas.....	59
2.3	- Escala de valores AHP para comparação pareada.....	72
4.1	- Principais planos de informação do banco de dados geográficos utilizado.....	85
4.2	- Cartas topográficas utilizadas.....	86
4.3	- Características das imagens de satélite utilizadas.....	87
4.4	- Trabalhos sobre escorregamentos e imagens Landsat.....	92
4.5	- Matriz de correlação entre as bandas ETM utilizadas.....	94
4.6	- Estatísticas das imagens originais.....	97
4.7	- Estatística das imagens PAN uniformizadas e os respectivos valores de ganho e offset utilizados no processo de uniformização radiométrica.....	98
4.8	- Estatística das imagens originais.....	98
4.9	- Estatística das imagens PAN uniformizadas em relação a componente I e os respectivos valores de ganho e offset utilizados no processo.....	98
4.10	- Parâmetros IFOV e EIFOV dos sensores HRV Spot e ETM Landsat.....	101
4.11	- Classes de declividade.....	110
4.12	- Ponderação das evidências – Média Ponderada.....	113
4.13	- Ponderação das evidências – AHP.....	115
4.14	- Exemplo de matriz de confusão utilizada para o cálculo do C_w	116
4.15	- Ponderação das evidências – Probabilidade Condicional.....	117
5.1	- Resultado da avaliação cartográfica.....	120
5.2	- Resultado da correlação de detalhes – HVR/ETM.....	124
5.3	- Resultado da correlação de detalhes – ETM/ETM.....	126
5.4	- Resultado da avaliação espectral – HRV/ETM.....	129
5.5	- Resultado da avaliação espectral – ETM/ETM.....	132
5.6	- Matriz de erros de classificação.....	139
5.7	- Avaliação da exatidão do produtor e do usuário.....	140
5.8	- Correlação entre classes de hipsometria e frequência de escorregamentos.....	146
5.9	- Correlação entre classes de declividade e frequência de escorregamentos.....	149
5.10	- Correlação entre classes de orientação das encostas e frequência de escorregamentos.....	152
5.11	- Correlação entre classes de distância de rios e frequência de escorregamentos.....	155
5.12	- Correlação entre classes de distância de estradas e frequência de escorregamentos.....	158
5.13	- Correlação entre classes de distância de lineamentos e frequência de escorregamentos.....	159
5.14	- Correlação entre classes de geologia e frequência de escorregamentos.....	163
5.15	- Correlação entre classes de pedologia e frequência de escorregamentos.....	166

5.16 - Correlação entre classes de uso e cobertura da terra e frequência de escorregamentos.....	169
5.17 - Resultado da avaliação do método booleano.....	174
5.18 - Resultado da avaliação do método média ponderada.....	177
5.19 - Resultado da avaliação do método AHP.....	181
5.20 - Resultado da avaliação do método probabilidade condicional.....	184
5.21 - Correlação entre a distribuição espacial das classes de susceptibilidade do mapa Média Ponderada em relação ao mapa AHP.....	189
5.22 - Correlação entre a distribuição espacial das classes de susceptibilidade do mapa AHP em relação ao mapa Probabilidade Condicional.....	189

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

AHP -	Analytical Hierarchy Process
ALC -	Ampliação Linear de Constraste
CV -	Coefficiente de Variação
Cw -	Contraste
Dho -	Distância Euclidiana
DP -	Desvio Padrão
EIFOV -	Effective Instantaneous Field of View
ENVI -	Environment for Visualizing Images
EP -	Erro de posicionamento
EPE -	Estimated Position Error
ETM+ -	Enhanced Thematic Mapper Plus
GPS -	Global Positioning System
HRV -	High Resolution Visible
HSV -	Hue-Saturation-Value
IIFOV -	Instantaneous Field of View
IHS -	Intensity-Hue-Saturation
LEGAL -	Linguagem Espacial para Geoprocessamento Algébrico
LN -	Razão de necessidade

LS -	Razão de suficiência
MAXVER -	Máxima Verossimilhança
MNT -	Modelo Numérico de Terreno
MSS -	Multispectral Scanner
NC -	Níveis de Cinza
PAN -	Pancromática
PCA -	Principal Components Analysis
PEC -	Padrão de exatidão cartográfica
PI -	Plano de informação
RGB -	Red-Green-Blue
RMSE -	Root Mean Square Error
SIG -	Sistema de Informação Geográfica
SPOT -	Systeme Probatoire d'Observation de la Terre
SPRING -	Sistema de Processamento de Informações Georreferenciadas
SR -	Sensoriamento Remoto
TM -	Thematic Mapper
Var -	Variância
WT -	Wavelet Transform
WTVE -	Wavelet Transform - Ventura
WTYO -	Wavelet Transform - Yocky

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, a expansão populacional e a intensa urbanização têm acentuado o processo de segregação sócio-espacial. Conseqüentemente, a ocupação desordenada de encostas tem exposto a população aos riscos geoambientais, principalmente aos *escorregamentos* (Souza, 2002).

Selby (1982) cita que os escorregamentos, de forma geral, são movimentos coletivos de massa (rocha ou solo) sob influência da gravidade sem a ajuda direta de outro meio como a água, ar, ou gelo. Entretanto, na maioria dos casos, a água indiretamente participa do processo diminuindo a resistência dos materiais nas encostas e contribuindo para o comportamento da fluidez e plasticidade do solo.

Segundo Xavier (1995), estes fenômenos são processos marcantes na evolução das encostas, caracterizando-se como movimentos rápidos que podem afetar desde pequenas áreas (poucos metros cúbicos) até encostas inteiras (centenas de metros cúbicos).

Associados às áreas urbanas, os escorregamentos têm ceifado milhares de vidas e ocasionado perdas materiais significativas (Fernandes e Amaral, 1996). Como exemplo, cita-se o Estado de São Paulo que, devido às suas condições naturais peculiares (extensos maços montanhosos) e ao intenso processo de ocupação, tem sido palco de um número significativo de eventos catastróficos de escorregamentos (Cruz, 1974; Guidicini e Iwasa, 1976; De Ploey e Cruz, 1979; Guidicini e Nieble, 1984; Wolle, 1988; Wolle e Carvalho, 1989; Augusto Filho, 1994; Augusto Filho e Wolle, 1996; Colangelo e Cruz, 1997).

Em decorrência desta problemática, tanto as instituições governamentais quanto a comunidade científica vêm buscando encontrar meios preventivos visando diminuir os impactos gerados pelos escorregamentos.

Segundo Fernandes e Amaral (1996), a investigação e a documentação sobre este fenômeno são procedimentos fundamentais visando a modelagem do processo e o direcionamento de propostas preventivas. Para Augusto Filho (1994) as ações preventivas podem ser realizadas sob um enfoque mais localizado e corretivo, como obras de engenharia para a estabilização de taludes, ou sob enfoque mais extensivo e preventivo, como na elaboração de mapeamentos de áreas propensas a escorregamentos, ordinariamente conhecidos como *mapeamentos de áreas de risco*.

Os métodos de mapeamento de áreas de risco a escorregamentos são classificados, basicamente, em três grupos distintos: heurísticos, determinísticos e estatísticos (Westen et al., 1997).

O método heurístico é o mais subjetivo dos métodos, uma vez que, para realizá-lo, um especialista decide o tipo e o grau de risco com base em levantamentos de campo e em mapas geomorfológicos detalhados do terreno (Carrara et al., 1995; Westen et al., 1997; Barredo et al., 2000; Westen et al., 2000).

O método determinístico tem como base os modelos de estabilidade, que levam em consideração informações detalhadas das encostas e são baseados nos princípios de mecânica de solos. Este método, assim como o estatístico, também busca eliminar a subjetividade, quantificando os graus de risco em valores absolutos, através do cálculo do fator de segurança (Terlien et al., 1995; Westen e Terlien, 1996; Fernandes et al., 2001).

O método estatístico tem como princípio básico a existência de interrelações entre os fatores condicionantes de instabilização e a distribuição de escorregamentos antigos e recentes na paisagem. A partir da combinação estatística destes fatores são determinados os graus de risco para as áreas livres de escorregamentos, ou seja, assume-se que os fatores que causaram os escorregamentos em uma determinada área correspondam aos mesmos que poderão gerar escorregamentos futuros em outros locais (Carrara et al., 1995; Chung et al., 1995; Westen et al., 1997).

McKean et al. (1991), Brunsden (1993) e Mantovani et al. (1996) salientam que o sensoriamento remoto (SR) possui excelente aplicabilidade para estudos de detecção e monitoramento das ocorrências de escorregamentos. O SR destaca-se também pela obtenção de séries históricas, rápida coleta de informações e baixo custo na aquisição de dados e informações (Schowengerdt, 1997, Mather, 1999). Além disso, atualmente existem diversas técnicas de processamento digital que permitem melhorar a qualidade visual das imagens e compensar as baixas resoluções espaciais dos sensores ópticos orbitais, como por exemplo, as *técnicas de fusão de imagens* (Pohl, 1998; Pohl e Van Genderen, 1998).

As técnicas de fusão visam obter novas imagens que combina as melhores características espectrais e espaciais das imagens originais (Pohl, 1998; Pohl e Van Genderen, 1998). Conforme Marcelino et al. (2003a), estas técnicas facilitam significativamente o processo de identificação de cicatrizes de escorregamentos para a elaboração do mapa de inventário, que é a base necessária para a construção dos mapas de susceptibilidade.

Com relação ao uso do Sistema de Informação Geográfica (SIG), Westen et al. (1997) citam que as análises conjuntas entre os diversos parâmetros do terreno e a distribuição espacial de escorregamentos foram amplamente facilitadas com o avanço tecnológico dos *softwares e hardwares*. Além disso, as ferramentas existentes em um SIG permitem realizar uma série de operações analíticas, com grandes conjuntos de dados, que até recentemente eram quase impossíveis de serem realizadas (Carrara et al., 1995). Estas ferramentas de análise, chamadas de *técnicas de inferência geográfica*, permitem a combinação múltipla de mapas com intuito de obter informações diferenciadas e reduzir a ambigüidade dos dados (Bonham-Carter, 1996; Burrough e McDonnell, 1998).

1.1 Objetivo

Neste trabalho, a hipótese levantada foi que, com os avanços das técnicas de sensoriamento remoto e do SIG, é possível realizar mapeamentos quantitativos de áreas susceptíveis a escorregamentos, diminuindo a subjetividade presente no processo.

Partindo desta hipótese, o trabalho teve como objetivo principal o desenvolvimento de uma abordagem quantitativa para a elaboração de mapeamento de áreas susceptíveis a escorregamentos, utilizando técnicas de sensoriamento remoto e SIG. Como objetivos complementares, foram realizadas avaliações quanto: a) as técnicas de fusão de imagens ópticas orbitais para a identificação de cicatrizes de escorregamentos; e b) as técnicas de inferência geográfica para a elaboração do mapa de susceptibilidade à ocorrência de escorregamentos.

1.2 Justificativa

Segundo Fernandes e Amaral (1996), em 1993, os escorregamentos causaram 2.517 mortes em todo o mundo, perdendo somente para os terremotos e as inundações. No Brasil a situação é semelhante, devido principalmente às condições climáticas (precipitações abundantes), às grandes extensões de maciços rochosos e às ocupações irregulares de encostas. Na Tabela 1.1 são apresentados os episódios de escorregamentos mais significativos que ocorreram no território brasileiro no período de 1928-2001, que resultaram em grandes prejuízos e mortes.

De meados dos anos 90 até os dias atuais, tanto o número de ocorrências de escorregamentos como de vítimas fatais aumentaram consideravelmente. Herrmann (2001) cita que em Santa Catarina foram registrados 117 casos no período de 1980-2000 que destruíram edificações, vias de transporte e propriedades, acarretando também diversas vítimas fatais.

Em Minas Gerais, no período de 18/08/02 a 31/12/02, ocorreram 15 escorregamentos que resultaram em 275 residências destruídas, 224 desabrigados e 10 vítimas fatais (Defesa Civil/MG, 2003a). Entretanto, só no mês de janeiro de 2003, em virtude das fortes chuvas, o número de escorregamentos aumentou assustadoramente, danificando 3.312 casas e 155 pontes, deixando 2.367 desabrigados, 14.398 desalojados e vitimando fatalmente 45 pessoas (Defesa Civil/MG, 2003b).

TABELA 1.1 – Principais escorregamentos ocorridos no Brasil (1928 – 2001).

Data	Local	Prejuízos
1928	Santos (SP)	60 mortes e destruição parcial da Santa Casa
1948	Vale do Paraíba (SP/RJ)	250 mortes e destruição de centenas de casas
1956	Santos (SP)	43 mortes e destruição de 100 casas
1956	Rio de Janeiro (RJ)	100 mortes
1967	Serra das Araras (RJ)	1.200 mortes e destruição de centenas de casas
1967	Caraguatatuba (SP)	120 mortes e destruição de 400 casas
1971	Salvador (BA)	104 mortes e milhares de desabrigados
1972	Campos do Jordão (SP)	Mais de 10 mortes e destruição de 60 casas
1974	Tubarão (SC)	40 mortes e destruição de casas, pontes e vias
1986	Lavrinhas (SP)	11 mortes e destruição de casas e pontes
1988	Cubatão (SP)	10 mortes
1988	Petrópolis (RJ)	171 mortes e 1.100 desabrigados
1988	Rio de Janeiro (RJ)	mais de 30 mortes e destruição de casas
1989	Salvador (BA)	100 mortes e destruição de dezenas de casas
1990	Blumenau (SC)	10 mortes, destruição de casas, pontes e vias
1992	Contagem (MG)	36 mortes, destruição de moradias e centenas de desabrigados
1995	Timbé do Sul (SC)	29 mortes, destruição de dezenas de plantações, edificações, pontes e vias
2001	Petrópolis (RJ)	65 mortes, mais de 300 famílias afetadas e centenas de casas destruídas

FONTE: Bigarella e Bigarella (1975), Augusto Filho (1994), Pellerin et al. (1997) e Petry (2003).

No Estado de São Paulo, segundo Defesa Civil/SP (2003), no período de 1995 a 2002, mais de 2.000 pessoas ficaram desabrigadas e ocorreram 34 vítimas fatais. Moraes

(2002) cita que, segundo levantamento realizado pela Defesa Civil/SP e pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT), existem atualmente 32,6 mil pessoas vivendo em áreas com risco de escorregamentos em 24 cidades do Vale do Paraíba e litoral norte. Das 170 áreas de risco existentes, 48 estão localizadas nos municípios do litoral norte paulista, com destaque para o município de Ubatuba, umas das áreas mais afetadas por escorregamentos.

Diante deste quadro, é fundamental que se realizem novos mapeamentos de áreas susceptíveis a escorregamentos, não só nas áreas densamente ocupadas como também nas áreas de expansão urbana, com o intuito de auxiliar as municipalidades no planejamento das formas de uso e ocupação da terra. Também é necessário aplicar e avaliar novas abordagens quantitativas, com o auxílio do sensoriamento remoto e SIG, buscando diminuir a subjetividade e aumentar cada vez mais a objetividade e o índice de confiabilidade destes mapeamentos.

CAPÍTULO 2

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Desastres Naturais

A ocorrência de eventos naturais extremos, como abalos sísmicos, vulcanismo, tornados, enchentes e escorregamentos, em áreas povoadas ou urbanizadas, gera impactos sócio-econômicos significativos. Tais eventos, apesar das diversas abordagens conceituais existentes, são comumente denominados de *desastres naturais* (Degg, 1992; Alexander, 1995).

Alcántara-Ayala (2002) define desastres naturais como eventos naturais extremos capazes de produzir danos físicos e sócio-econômicos, no momento da ocorrência ou posteriormente, em virtude de suas conseqüências. Apesar de serem esperados, a maioria dos eventos ocorrem de maneira súbita e violenta.

Alexander (1995) cita que, associado ao termo desastre natural, está a definição do agente geofísico, o número de mortes, o custo dos danos e o impacto sobre o sistema social. São estes quatro pressupostos que possibilitam distinguir um desastre de um evento natural (Coppok, 1995).

Com relação à sua gênese, os desastres estão associados a diversos agentes ou processos geofísicos, principalmente aqueles associados à dinâmica e à modelagem da superfície terrestre, como os terremotos, vulcões, movimentos de massa, entre outros. Alcántara-Ayala (2002) categoriza estes eventos como endógenos (vulcanismo e tectonismo), exógenos (movimentos de massa, avalanches de neve, erosão costeira, tsunamis, etc.) e os induzidos por mudanças climáticas e uso da terra (desertificação, enchentes, erosão do solo, etc.).

Segundo Alexander (1995), todo desastre possui quatro dimensões fundamentais: (a) tempo - fornece uma linha temporal sobre o comportamento do fenômeno; (b) espaço - local em que os eventos desdobram-se; (c) magnitude - expressa a abrangência de um

evento extremo; e (d) intensidade - refere-se ao tamanho e à intensidade dos impactos e/ou outros efeitos.

Nas últimas décadas houve um incremento no número e na intensidade dos desastres naturais, em função do aumento populacional, do processo de segregação sócio-espacial e da acumulação de capital fixo em zonas perigosas (*hazard zones*) (Alexander, 1995).

Conforme a Tabela 2.1, houve um incremento no número de desastres naturais no período 1969-89 em relação ao de 1947-67, passando de 716 para 1.055 eventos catastróficos. No entanto, o que chamou mais atenção foi o aumento significativo do número de mortes, principalmente na Região 3, onde o acréscimo foi superior a 100 %. Degg (1992) e Alcántara-Ayala (2002) explicam que estes números refletem as próprias condições sócio-econômicas dos países em desenvolvimento, como a falta de planejamento, infraestrutura inadequada, falta de investimentos na educação e na saúde, entre outros.

TABELA 2.1 – Desastres naturais ocorridos no mundo (1947-1989).

1947 - 1967				1969 – 1989			
Reg.	Desastres	Mortes	Mor./Des.	Reg.	Desastres	Mortes	Mor./Des.
1	210	7.965	38	1	253	4.683	19
2	85	19.575	230	2	87	8.575	99
3	421	414.315	984	3	715	1.476.868	2.066
Total	716	441.855	617	Total	1.055	1.490.129	1.412

Regiões: (1) América do Norte, (2) Europa – com exceção dos países que formavam o “bloco comunista” e (3) os demais países – formados principalmente pelos países em desenvolvimento acrescido de Japão e Austrália.

FONTE: adaptada de Degg (1992).

Alexander (1995) entende que esta situação poderá agravar-se nos próximos anos. O autor estima que a população mundial atinja 7,27 bilhões em 2015 e 12,5 bilhões em 2050. Desta forma, aumentará consideravelmente a demanda por terras em função do processo de ocupação e produção de alimentos. As classes menos favorecidas e

marginalizadas serão pressionadas a ocupar áreas instáveis ou mais propícias a recorrências de eventos naturais extremos.

No entanto, dependendo do evento geoambiental, muitos dos desastres naturais foram ocasionados ou induzidos pela ação humana. Monteiro (1991) menciona que as enchentes e os escorregamentos não seriam danosos se nas cidades parte de seus habitantes não fosse induzida a formas de urbanização espontânea e precária em sítios perigosos. Augusto Filho (1994) menciona que mais de 90% dos escorregamentos ocorridos em 1988 no município de Petrópolis (RJ) foram influenciados pela ocupação desordenada de encostas.

Neste contexto, é necessário considerar a participação do homem nas análises de risco, na medida em que suas ações venham a contribuir com o aumento da frequência ou dos impactos causados pelos desastres naturais (Lavell, 1996).

Einstein (1997) e Castro (2000), analisando as relações conceituais entre risco (*risk*), perigo (*hazard*) e desastre (*disaster*), comentam que o desastre é formado por um conjunto de prejuízos, produto de um perigo, derivado de um risco (Figura 2.1).

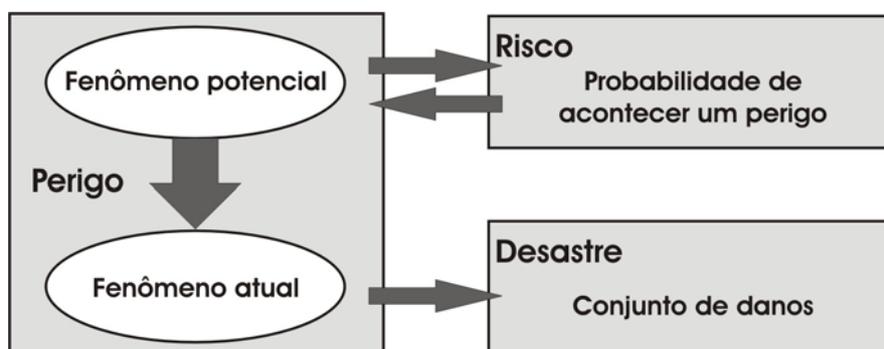


FIGURA 2.1 – Relação conceitual entre risco, perigo e desastre.
FONTE: adaptada de Castro (2000).

Ogura e Macedo (2002), exemplificando tal relação, relatam que um fenômeno atmosférico extremo como um tufão, que ocorre em épocas e regiões conhecidas, é um perigo, uma ameaça potencial a pessoas e bens. Se este se deslocar na direção de uma área povoada, teremos então uma situação de risco, ou seja, existe uma possibilidade real de perdas e danos. Se o tufão atingir a área povoada, provocando danos materiais e

vítimas, será denominado como um desastre natural. Caso o mesmo ocorra e não ocasione danos sócio-econômicos, será considerado como um evento natural. Esta relação também pode ser estendida a outros fenômenos extremos, como por exemplo, os movimentos de massa.

2.2 Movimentos de Massa

Os movimentos de massa (*mass movements*) são processos que envolvem o desprendimento, o transporte e a deposição de solo e/ou material rochoso encosta abaixo sob ação da gravidade, contribuindo para a modelagem da paisagem (Selby, 1982).

Fiori (1995) cita que a força da gravidade origina tensões cisalhantes no interior do manto de alteração ao longo das vertentes¹. Estas tensões, responsáveis pela ocorrência dos movimentos de massa, aumentam com a inclinação e a altura das encostas, com o peso específico do solo e com a quantidade de água que se infiltra e acumula no mesmo. Neste processo, a água desempenha papel fundamental alojando-se nos planos potenciais de ruptura, diminuindo a resistência mecânica do solo, pelo efeito da pressão neutra e em função da lubrificação destes planos.

Tanto chuvas intensas de curta duração quanto de longa duração fornecem condições propícias para a diminuição da resistência do solo, atuando como um dos principais agentes deflagradores de movimentos de encostas em ambientes tropicais úmidos (Guidicini e Iwasa, 1976).

As principais variáveis condicionantes de escorregamentos podem ser agrupadas, de forma geral, em seis grandes fatores geoambientais: (a) geologia, (b) pedologia, (c) geomorfologia, (d) clima, (e) cobertura vegetal e (f) antropismo (Prandini et al. 1976; Guidicini e Iwasa, 1976; Augusto Filho, 1994; Fiori, 1995; Lopes, 1995; Fernandes e Amaral, 1996; Fernandes et al., 2001).

¹ Cisalhamento: consiste na deformação resultante de esforços, que faz com que as partes contíguas de um corpo deslizem uma em relação à outra, em direção paralela ao plano de contato entre as mesmas (Fiori, 1995; Guerra e Guerra, 2001).

a) *Geologia*

Os principais fatores condicionantes estão intimamente vinculados ao tipo de rocha (litologia) e às características estruturais, tais como as falhas, fraturas, bandamentos, foliações e inclinação das camadas (Selby, 1982; Fiori, 1995).

Lepsch (2002) menciona que a litologia, mesmo exercendo um “papel passivo” à ação climática e orgânica, influencia no tipo de solo (material mineral), como também nas suas características intrínsecas (permeabilidade, resistência ao cisalhamento, cor, granulometria, etc.).

Segundo Lopes (1995), a natureza da rocha é importante porque, em função da presença ou ausência de minerais resistentes como o quartzo, determina o comportamento mecânico e mineralógico do regolito. Esta variação de comportamento entre litologias, solos e rochas diversas dão origem a planos potenciais de ruptura no contato entre os mesmos (Fiori, 1995).

As características estruturais que representam os pontos de menor resistência e descontinuidades desempenham papel fundamental na infiltração e circulação da água, e, conseqüentemente, atuam como caminhos preferenciais de alteração (Selby, 1982; Fiori, 1995; Fernandes e Amaral, 1996). Assim, corpos rochosos de material consistente e compacto são transformados em um manto particulado, inconsistente e friável (Lopes, 1995).

Além disso, conforme Selby (1982) e Fiori (1995), a inclinação das camadas, fraturas e planos de falhas ou de foliação são importantes fatores no processo de instabilização das vertentes, principalmente quando apresentam o mesmo sentido de inclinação das mesmas formando planos potenciais de escorregamentos.

b) *Pedologia*

Os solos podem influenciar e sofrer a ação dos processos erosivos, em virtude da sua textura, estrutura, permeabilidade e densidade (Fiori, 1995; Bigarella et al., 1996; Salomão, 1999; Fiori e Carmignani, 2001; Lepsch, 2002).

A textura refere-se à proporção relativa das partículas sólidas no solo, influenciando na capacidade de infiltração e absorção de água da chuva (Bigarella et al., 1996). Solos mais arenosos são mais porosos, permitindo rápida infiltração da água, e, conseqüentemente, menor capacidade de armazenamento (Salomão, 1999).

O arranjo espacial das partículas no solo, que corresponde à sua estrutura, também influencia no direcionamento e na velocidade de infiltração da água (Fiori, 1995). Além disso, pode interferir no aumento ou na diminuição da força de atrito nas camadas detriticas (Salomão, 1999)

A permeabilidade está intimamente ligada à porosidade, ou seja, em geral solos arenosos são mais permeáveis do que solos argilosos, por serem mais porosos (Caputo, 1977; Fiori e Carmignani, 2001). A porosidade e a permeabilidade são inversamente proporcionais à densidade, que representa a relação entre o volume e a massa total do solo (Fiori, 1995; Fiori e Carmignani, 2001).

Além destes fatores, conforme Fernandes e Amaral (1996), as discontinuidades presentes no solo também podem gerar um plano potencial de ruptura. Por exemplo, um paleo-horizonte argiloso soterrado por sedimentos arenosos recentes ou mesmo depósitos de encostas sobre a rocha sã, geram discontinuidades mecânicas e hidrológicas ao longo destes contatos. A drástica diminuição da condutividade hidráulica favorece a geração de fluxos d'água subsuperficiais, com forte componente lateral, diminuindo a resistência ao cisalhamento nas zonas de contato. Além disso, a presença de grande quantidade de água aumenta o peso específico do solo, favorecendo o deslocamento da massa pela ação da gravidade.

c) *Geomorfologia*

A geomorfologia também condiciona a ocorrência de escorregamentos em função dos parâmetros morfométricos, com destaque para a forma e a orientação das encostas, a declividade e a altimetria (Christofolletti, 1980; Fernandes e Amaral, 1996; Fernandes et al., 2001).

Com relação à forma das encostas, as seções côncavas (*hollows*), por serem zonas de convergência de sedimentos e de fluxos d'água, são as mais favoráveis para a ocorrência de escorregamentos (Guerra, 1995; Fernandes e Amaral, 1996). Isto acontece devido à concentração de água, tanto em superfície quanto em sub-superfície, favorecendo a condição de saturação dos horizontes pedológicos (Fernandes et al., 2001). Selby (1985) destaca também as encostas retilíneas como áreas onde predominam processos erosionais de grande velocidade, como os fluxos rasos de detritos (*shallow debris flows*).

A orientação das encostas fornece informações sobre as que se encontram mais expostas às variáveis climatológicas, como por exemplo, vento e insolação (Dai e Lee, 2002; Donati e Turrini, 2002; Zhou et al., 2002).

Tanto Donati e Turrini (2002) quanto Dai e Lee (2002) comentam que a orientação das encostas afeta indiretamente a resistência ao cisalhamento em virtude de estar intimamente relacionada à presença de umidade e de cobertura vegetal. Além disso, as precipitações pluviométricas estão condicionadas à direção predominante dos ventos, ou seja, a quantidade de chuva será maior nas encostas expostas a estes eventos atmosféricos (Dai e Lee, 2002). Nesse sentido, Zhou et al. (2002), analisando os escorregamentos ocorridos na Ilha de Lantau em Hong Kong, verificaram que as encostas mais afetadas pelos escorregamentos tinham suas faces voltadas para a direção oeste, no sentido contrário aos ventos, que empurram a instabilidade ocasionando intensas precipitações orográficas.

A velocidade do deslocamento e, portanto, a capacidade de transporte de material são proporcionais à inclinação e ao comprimento de rampa (Lopes, 1995). A inclinação contribui com o incremento da atuação da força gravitacional sobre a cobertura de solo. Segundo Donati e Turrini (2002), quanto maior a declividade maior será a componente vertical da gravidade.

Diversos estudos têm demonstrado que a maior parte dos escorregamentos tem ocorrido principalmente em declividades na faixa de 20° a 45°. Fernandes e Amaral (1996) comentam que este comportamento é explicado pelas variações na presença da

cobertura vegetal e pelo tipo de solo associado. Por exemplo, nas encostas mais íngremes (alta encosta) ocorre a presença de solos litólicos, pouco desenvolvidos, com presença de cobertura vegetal de pequeno a médio porte (Penteado, 1974). Isto gera uma condição de baixa instabilidade em virtude da pouca capacidade de retenção da água e da diminuição da componente peso (Fernandes et al., 2001). Nas baixas encostas, com declividades geralmente inferiores a 20°, Wolle e Carvalho (1989) mencionam que ocorrem extensas acumulações coluvionares, geralmente em terrenos muito mais suaves, não comprometendo desta forma a estabilidade das vertentes.

d) *Clima*

O papel do clima está relacionado basicamente com o regime pluviométrico e suas conseqüências sobre os processos morfogenéticos. Tanto as precipitações anômalas quanto as contínuas podem contribuir para deflagrar os escorregamentos, ou seja, ambas produzem o encharcamento do solo. Este encharcamento produz a saturação, diminuindo a coesão no contato rocha-solo e a resistência desse material à erosão, favorecendo o aumento das tensões cisalhantes (Guidicini e Iwasa, 1976; Fiori, 1995; Fernandes e Amaral, 1996).

Prandini et al. (1976), Souza (2002) e Fiori (1995) mencionam que, dentre as principais formas de atuação da água no solo, destacam-se: o aumento do grau de saturação, reduzindo a coesão; a elevação da lâmina d'água, facilitando o encontro com a frente de saturação; o estabelecimento de fluxo subterrâneo nas zonas de contatos entre o manto de alteração e a rocha sã; aumento do peso da massa detrítica; incremento de pressões hidrostáticas em planos de descontinuidades estruturais de rochas e solos (fendas e trincas).

Guidicini e Iwasa (1976) citam que episódios de chuva intensa superiores a aproximadamente 12% da pluviosidade média anual tendem a provocar escorregamentos. Para que tais episódios atinjam o caráter de catástrofe é preciso que superem a 20% da pluviosidade média anual. Segundo os autores, quando os níveis de pluviosidade são muito elevados, podem deflagrar escorregamentos tanto em áreas ocupadas ou alteradas quanto em áreas virgens, ou seja, os demais fatores que atuam nas

encostas assumem papel secundário nos episódios de chuvas intensas. Como exemplo, destacam-se as precipitações elevadas que ultrapassam os 12% da médial anual, em períodos de 24 ou 72 horas.

No entanto, Wolle e Carvalho (1989) comentam que a ação combinada de chuva precedente e de chuva intensa de curta ou média duração são as maiores responsáveis pela deflagração de escorregamentos em meio tropical úmido. Tanto que, conforme Guidicini e Iwasa (1976), se os episódios de chuvas intensas forem precedidos por dias de chuvas contínuas, 8% da pluviosidade média anual já bastam para ocasionar escorregamentos generalizados.

e) *Cobertura vegetal*

A vegetação assume um importante papel na proteção do solo principalmente contra os processos erosivos superficiais (Mafra, 1999; Salomão, 1999). Como fator de proteção aos horizontes superficiais de solo, a vegetação age tanto em nível de dossel quanto de solo e de subsolo (Guerra, 1995; Coelho Neto, 1995).

No nível de dossel a cobertura vegetal reduz a quantidade de energia que chega ao solo durante uma chuva. Além do que, retém parte do volume de água precipitada nos diversos componentes do edifício vegetal, liberando-o para a atmosfera por evapotranspiração durante e após as chuvas (Guerra, 1995; Coelho Neto, 1995).

No solo, a serrapilheira tem uma atuação significativa, contribuindo também com a interceptação da chuva, reduzindo o efeito *splash*. Conseqüentemente, também evita a compactação do solo e diminui a velocidade do escoamento superficial (Coelho Neto, 1995; Fiori e Borchardi, 1997).

O sistema radicular atua mecanicamente penetrando nas camadas do solo, contribuindo para a sua estruturação. Além disso, ao se decomporem, as raízes deixam diversas cavidades tubulares que aumentam a infiltração e melhoram a aeração do solo (Guerra, 1995; Coelho Neto, 1995).

No entanto, é necessário destacar que, com relação aos movimentos coletivos de massa, existem algumas divergências sobre o papel da vegetação na estabilidade das encostas (Prandini et al., 1976).

Augusto Filho (1994) atribui como efeitos favoráveis a redistribuição da água da chuva e o acréscimo da resistência do solo devido à presença das raízes (reforço mecânico e escoramento). Prandini et al. (1976) citam que o seu efeito frenador e dissipador de energia do material em deslocamento circunscribe a área afetada, minimizando os danos em terrenos situados a jusante do escorregamento.

Guthrie (2002), analisando a ocorrência de escorregamentos na Ilha de Vancouver (Canadá), provou que o número de escorregamentos aumentou consideravelmente a partir dos anos 70 quando se intensificaram as atividades de desmatamento. Nas bacias hidrográficas de Macktush e Nahwitti, o número de escorregamentos nas áreas afetadas aumentou 11 e 16 vezes, respectivamente; enquanto nas áreas naturais, o número de escorregamentos apresentou um comportamento relativamente estável desde os anos 50, girando em torno de 15% e 25% para ambas as bacias.

Jakob (2000) também encontrou números surpreendentes para a mesma região (Ilha de Vancouver). Na área de Sound Clayoquot, o autor concluiu que dos 1004 escorregamentos analisados, 49% estavam relacionados com as áreas desmatadas. Ele salienta que as áreas afetadas pelos desmatamentos correspondem a somente 10% do total das áreas florestadas, ou seja, a frequência de escorregamentos foi 9 vezes maior nas áreas desflorestadas.

Por outro lado, como efeitos desfavoráveis da vegetação, Prandini et al. (1976) mencionam o efeito alavanca (ação dos ventos), o efeito cunha (penetração das raízes em fendas) e a sobrecarga vertical (peso da vegetação).

Prandini et al. (1976) comentam que a remoção da sobrecarga e, conseqüentemente, a eliminação da ação dos ventos sobre a vegetação, aumentam de imediato a segurança de uma vertente. Mas, ao cabo de um determinado tempo, ocorre novamente o incremento da instabilidade em virtude da deterioração do sistema radicular e da eliminação da

redistribuição da água da chuva. Este intervalo de tempo irá depender da densidade de raízes, tamanho, resistência à tração, forma das mesmas e tipo de vegetação.

Fiori e Borchardt (1997), analisando o comportamento e a influência da vegetação na estabilidade das encostas da Serra do Mar no litoral paranaense, verificaram que o efeito da vegetação nos índices de segurança é maior em vertentes pouco inclinadas, diminuindo gradativamente com o aumento da declividade. Em vertentes com inclinação em torno de 45°, o efeito da vegetação sobre os índices de segurança é insignificante.

Isto vem comprovar, como já mencionado, que durante episódios de chuvas intensas, os escorregamentos ocorrem também em grande número em áreas virgens, atuando como fenômeno natural modelador da paisagem.

f) *Antropismo*

A interferência antrópica dá-se principalmente pelo avanço das formas de uso e ocupação em áreas naturalmente susceptíveis aos escorregamentos (Larsen e Torres-Sánchez, 1998; Jakob, 2000; Chang e Slaymaker, 2002; Guthrie, 2002). Por exemplo, Casseti (1991) cita que, a partir do momento em que o homem apropria-se de uma vertente, tendo-a como suporte ou recurso, o que se dá através dos desmatamentos, cortes e aterros, altera suas relações processuais morfodinâmicas, aumentando a ação dos processos erosivos. Wolle et al. (1977) também citam que os desmatamentos e aberturas de cortes tendem a acelerar fortemente as ocorrências de escorregamentos, desencadeando fenômenos menos superficiais, capazes de atingir o maciço rochoso em maiores profundidades.

Augusto Filho (1994) apresenta uma síntese das principais ações antrópicas indutoras dos escorregamentos, como: remoção da cobertura vegetal; lançamento e concentração de águas pluviais e/ou servidas; vazamentos na rede de abastecimento, esgoto e presença de fossas; execução de cortes com geometria inadequada (altura/inclinação); execução deficiente de aterros (compactação, geometria, fundação); lançamento de lixo nas encostas; e vibrações produzidas por tráfego pesado.

Além dos efeitos causados pela remoção da cobertura vegetal, como já mencionado, os cortes em encostas, quando mal planejados, geram condições propícias à ocorrência de escorregamentos. Zêzere et al. (1999), analisando os eventos ocorridos na região norte de Lisboa (Portugal), chegaram à conclusão que, dos 597 escorregamentos ocorridos, 484 (81%) ocorreram em virtude da interferência humana direta (desmatamentos, estradas, cultivos) ou indireta (áreas de regeneração), sendo que 20% dos escorregamentos foram induzidos pelos cortes de encostas para a construção de casas e estradas.

Guthrie (2002) encontrou um alto número de casos associados a períodos posteriores a construção de rodovias na Ilha de Vancouver. Das três bacias hidrográficas analisadas, o incremento no número de ocorrência de escorregamentos foi de 12, 27 e 94 vezes para as bacias Artlish, Macktush e Nahwitti, respectivamente. Chang e Slaymaker (2002) verificaram que, após a construção de uma rodovia na bacia do Rio Ho-she (Taiwan) em 1980, a área afetada pelos escorregamentos aumentou cerca de 119 ha no período de 1980 a 1985, numa taxa de 24 ha/ano. Larsen e Torres-Sánchez (1998) também verificaram que dos 4.039 escorregamentos analisados em três áreas montanhosas de Porto Rico, 1.359 (37%) estavam associados à presença de rodovias e de edificações.

Com relação a áreas edificadas, Fernandes et al. (1999), analisando o processo de ocupação no Maciço da Tijuca (RJ), verificaram que cerca de 50% dos 242 escorregamentos existentes no maciço ocorreram em favelas, que cobrem somente 4,6% da área total do maciço. Os autores explicam que esta elevada frequência de escorregamentos está intimamente relacionada com o aumento dos cortes para a construção de barracos e outros fatores (esgoto, fossas, etc.), em encostas íngremes situadas no sopé de afloramentos rochosos.

2.3 Classificação de Movimentos de Massa

Os movimentos de massa são classificados quanto à cinemática do movimento (velocidade e direção), o tipo de material (solo, rocha, detritos, etc.), a geometria (tamanho e forma das massas) e o conteúdo de água (Figura 2.2) (Carson e Kirkby, 1975; Selby, 1982; Crozier, 1986; Fernandes e Amaral, 1996).

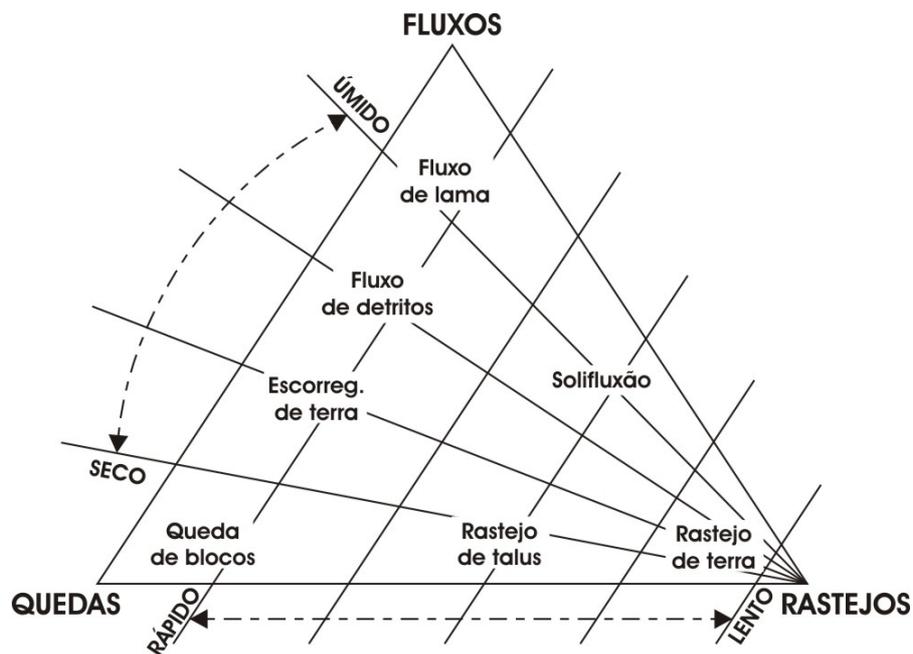


FIGURA 2.2 – Classificação de movimentos de massa.
 FONTE: adaptada de Carson e Kirkby (1975).

Devido à complexidade dos critérios de análise, surgiram diversas classificações com respeito aos movimentos de massas. Basicamente, conforme classificação proposta por Augusto Filho (1994), destacam-se quatro tipos de movimentos: os rastejos, os escorregamentos, as corridas e as quedas de blocos.

Mousinho e Bigarella (1965) citam que o **rastejo** (*creep*) é um movimento lento de rochas e solo vertente abaixo, influenciada, principalmente, pela ação da gravidade. No entanto, Christofolletti (1980) e Guidicini e Nieble (1984) comentam que as variações térmicas e a umidade podem afetar o deslocamento das massas, em função do processo de contração e expansão da manto de intemperismo. Mesmo assim, sua movimentação é praticamente imperceptível (cm/ano), sendo que as taxas de deslocamento decrescem gradualmente com a profundidade do manto de intemperismo (Christofolletti,1980; Selby, 1982; Augusto Filho 1994).

Este tipo de processo não apresenta uma superfície de ruptura marcante, tanto que sua identificação dá-se pela mudança na verticalidade das árvores, postes, muros, etc. (Figura 2.3) (Christofolletti,1980; Guidicini e Nieble; 1984; Augusto Filho 1994).

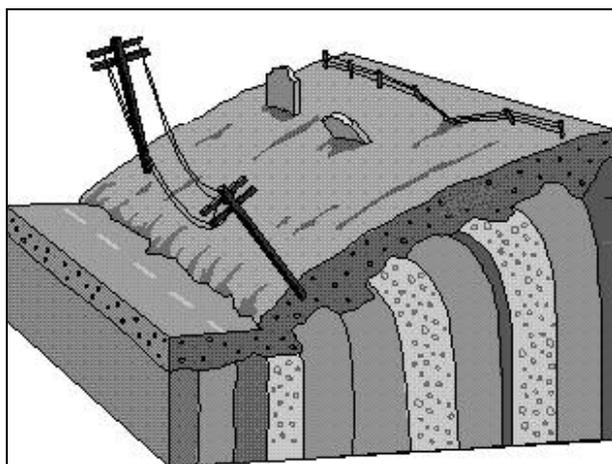


FIGURA 2.3 – Rastejo (*creep*).
FONTE: MEM (1997).

Guidicini e Nieble (1984) e Fernandes e Amaral (1996) citam que os **escorregamentos** (*slides*) são movimentos rápidos (m/h a m/s), de curta duração, com plano de ruptura bem definido, permitindo a distinção entre o material transportado e o não-transportado.

O processo dá-se em função de uma conjuntura de fatores, elevadas declividades, altos índices de pluviosidade, antropismo, etc., que contribuem para a desestabilização das encostas. Escorregamentos em encostas produzem cicatrizes côncavas ao lado de partes deposicionais convexas. Estas feições são geralmente alongadas, podendo apresentar uma relação comprimento-largura de cerca de 10:1 (Mousinho e Bigarella, 1965; Christofolletti, 1980; Fernandes e Amaral, 1996).

Em virtude da massa transportada e da geometria do plano de ruptura, os escorregamentos classificam-se em rotacionais e translacionais (Guidicini e Nieble, 1984; Augusto Filho, 1994; Fernandes e Amaral, 1996).

Fernandes e Amaral (1996) citam que os **escorregamentos rotacionais** (*slumps*) apresentam uma superfície de ruptura côncava, ao longo da qual ocorre um movimento rotacional do manto de alteração (Figura 2.4). Basicamente, estão associados a pacotes de solos espessos e homogêneos, de rochas argilosas ou cristalinas intensamente fraturadas. A gênese dos escorregamentos rotacionais está freqüentemente vinculada a cortes na base das vertentes, sejam artificiais (implementação de estradas) ou naturais (erosão fluvial).

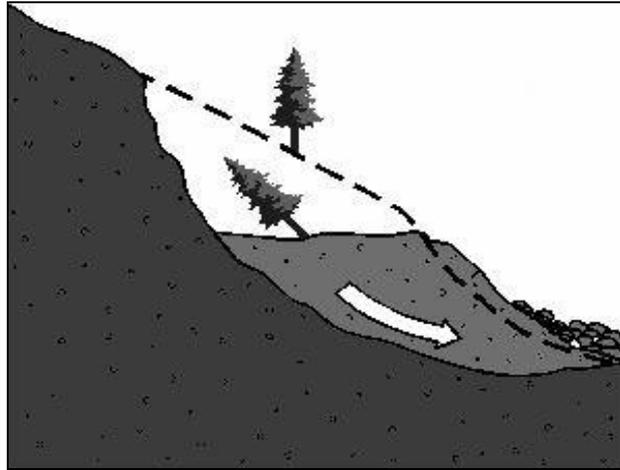


FIGURA 2.4 – Escorregamento rotacional (*slump*).
FONTE: MEM (1997).

Os **escorregamentos translacionais** ocorrem geralmente em solo pouco desenvolvido, em encostas com elevadas declividades, associados a períodos de pluviosidade intensa ou de longa duração que saturam as camadas de solo, deflagrando a desagregação e o transporte do mesmo (Augusto Filho, 1994). Fernandes e Amaral (1996) citam que estes tipos de movimentos são compridos e rasos, onde o plano de ruptura encontra-se, geralmente, em profundidades rasas que variam entre 0,5 m e 5,0 m (Figura 2.5). Além disso, conforme estes autores, as rupturas tendem a ocorrer rapidamente devido ao aumento da poro-pressão positiva durante os eventos pluviométricos.

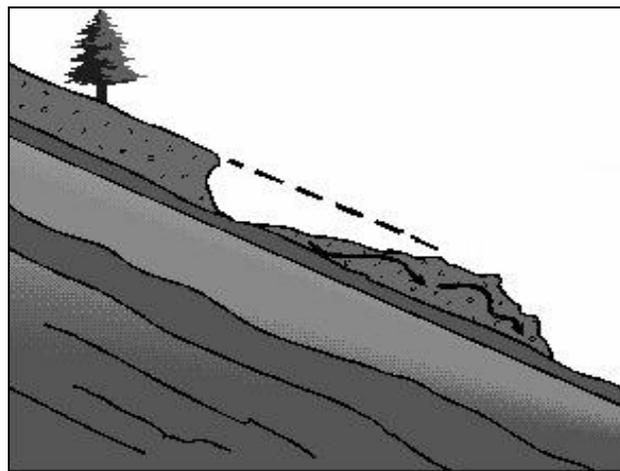


FIGURA 2.5 – Escorregamento translacional (*translational landslide*).
FONTE: MEM (1997).

As **corridas** (*flows*) são movimentos rápidos (m/s), nos quais os materiais se comportam como fluidos altamente viscosos, formados por grandes volumes de rochas, solos e detritos (Augusto Filho, 1994; Fernandes e Amaral, 1996).

As corridas estão geralmente associadas à concentração excessiva dos fluxos de água superficiais, provenientes de precipitações anômalas, que deflagram em algum ponto da encosta um processo de fluxo contínuo de material terroso (Fernandes e Amaral, 1996).

Apesar de serem mais raras de ocorrer, as corridas produzem estragos maiores que os escorregamentos translacionais. No entanto, a distinção entre os dois nem sempre é fácil, pois, em alguns casos, as corridas iniciam-se sob a forma de um escorregamento e, ao atingir um curso d'água, o material deslocado ganha velocidade e fluidez, passando a se comportar como uma corrida.

Segundo Selby (1982), outros termos estão associados às corridas, variando conforme a viscosidade (presença de água) e o tipo de material mobilizado, como por exemplo, os fluxos de terra (*earthflows*), os fluxos de lama (*mudflows*) e os fluxos de detritos (*debrisflows*) (Figura 2.6).

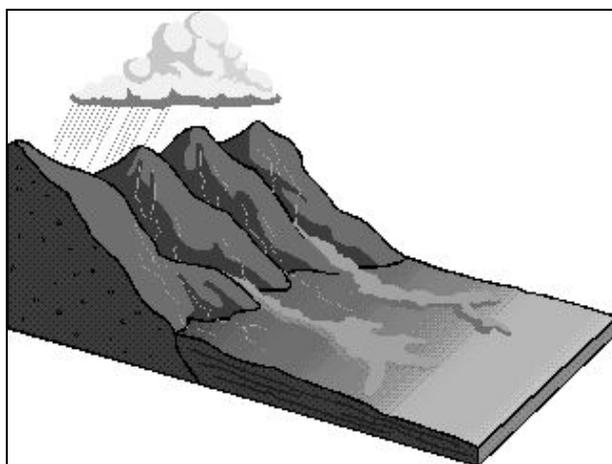


FIGURA 2.6 – Corrida de lama (*earthflow*).
FONTE: MEM (1997).

As **quedas** (*falls*) são movimentos desenvolvidos em declives com ângulos próximos a 90°, atingindo velocidades muito altas (m/s). Dá-se pelo desprendimento de blocos e/ou de lascas de rochas caindo em queda livre, rolamento ou tombamento sob efeito da

gravidade (Figura 2.7) (Augusto Filho, 1994). A ocorrência de blocos é favorecida pelas discontinuidades nas rochas (fraturas e bandamentos), associadas à presença de agentes químicos e físicos, que favorecem o intemperismo esferoidal, isolando as rochas e matacões na superfície das encostas (Fernandes e Amaral, 1996).



FIGURA 2.7 – Quedas (*falls*).
FONTE: MEM, (1997).

Entretanto, a definição dos movimentos é dificultada pela semelhança existente entre os processos, principalmente entre os escorregamentos (*slides*) e os fluxos de detritos (*debrisflows*) oriundos do manto de intemperismo. Ambos os fenômenos apresentam características semelhantes em relação a forma, a velocidade, ao material e ao volume transportado. Além do que, também estão associados à participação intensa da água. Desta forma, alguns autores costumam caracterizar, de forma genérica, os movimentos de massa como escorregamentos (*landslides*) (Cruden, 1991; Thomas, 1994; Coussot e Meunier, 1996).

2.4 Tipos de Mapeamentos de Áreas Propensas a Escorregamentos

Nos últimos anos ocorreram grandes progressos na investigação e documentação dos escorregamentos, em virtude da necessidade de informações sobre a instabilidade das encostas que pudessem ser usadas por planejadores para amenizar os impactos sócio-econômicos ocasionados por estes fenômenos (Guzzetti et al., 1999; Parise, 2001). Fernandes e Amaral (1996) mencionam que a documentação, como fruto da investigação, procura gerar dados passíveis de análise visando à prevenção de

escorregamentos, como também servir de base à modelagem dos processos, facilitando o entendimento da tipologia, magnitude e frequência dos movimentos.

Basicamente, estes mapeamentos podem ser divididos em três categorias principais: mapas de inventário, de susceptibilidade e de risco (Brunsden, 1993; Guzzetti et al., 1999; Westen et al., 1999; Parise, 2001).

2.4.1 Mapa de Inventário

Segundo Carrara et al. (1995), Westen et al. (1997) e Parise (2001), um mapa de inventário de escorregamentos (*landslide inventory map*) representa a distribuição espacial dos movimentos de massa, podendo incluir informações como tipo, tamanho, forma e estado de atividade. Este mapa normalmente é construído com informações obtidas em campo, com fotografias aéreas e com imagens de satélite, onde são identificadas as cicatrizes deixadas nas encostas pelos escorregamentos (Brunsden, 1993; Mantovani et al., 1996; Temesgen et al., 2001).

Mantovani et al. (1996) e Parise (2001) citam que o mapa de inventário é a base necessária para a produção de mapas adicionais, como mapas de susceptibilidade e de risco de escorregamento. Também podem ser usados como uma forma primária de mapa de perigo (*hazard map*), pois, conforme Carrara et al. (1995), as condições de terreno em que os escorregamentos antigos e recentes ocorrem, geralmente são as mesmas que poderão deflagrar eventos no futuro.

2.4.2 Mapa de Susceptibilidade

Fernandes e Amaral (1996) e Ahmad e McCalpin (1999) citam que este tipo de mapa constitui-se em uma ferramenta indispensável para a amenização das consequências geradas pelos escorregamentos, através da elaboração e implementação de estratégias e medidas estruturais apropriadas. Basicamente, conforme Parise (2001), este mapeamento fornece informações que são utilizadas para definir níveis potenciais de ocorrência de escorregamentos para uma determinada área.

Fernández et al. (1999) definem susceptibilidade a escorregamentos como a tendência de um evento futuro ocorrer em uma área específica, podendo ser mensurada a partir da correlação entre os fatores condicionantes e a distribuição de escorregamentos na paisagem.

Clerici et al. (2002) mencionam que estes mapas apresentam um modelo conceitual comum, que consiste de:

- Mapeamento de escorregamentos (inventário);
- Mapeamento dos fatores geoambientais, que influenciam direta ou indiretamente na estabilidade das encostas;
- Estabelecimento da correlação entre os fatores geoambientais (litologia, forma das encostas, declividade, etc.) e os escorregamentos antigos e recentes;
- Classificação das unidades de paisagem em diferentes graus de susceptibilidade, com base nas relações identificadas.

Assim, a elaboração deste mapa tem como ponto de partida o mapa de inventário, onde se analisam as condições das áreas em que ocorreram os escorregamentos. Após elaboração do mapa de inventário, são elaborados mapas temáticos contendo informações sobre geologia, geomorfologia, pedologia, uso da terra, entre outros. Posteriormente, em ambiente SIG, é realizada a sobreposição dos mapas, definindo-se as diferentes zonas de susceptibilidade, onde são identificados graus de propensão à ocorrência de escorregamentos (Fernández et al.; 1999; Parise, 2001; Clerici et al., 2002).

Ahmad e McCalpin (1999) mencionam que o mapa de susceptibilidade é fundamental para os planejadores, pois permite elaborar medidas de prevenção e amenização de danos e direcionar as políticas públicas para a regulamentação das formas de uso e ocupação da terra.

2.4.3 Mapa de Risco

IUGS Working Group on Landslides (1997) define risco como uma medida da probabilidade e severidade de um evento adverso sobre a saúde, propriedade e meio ambiente. Conforme Leroi (1997), em função do perigo, da vulnerabilidade e custo, o risco também pode ser expresso como:

$$R = \sum_i A_i * \left(\sum_j V_{ji} * C_j \right) \quad (2.1)$$

onde, R é o risco, A_i é o perigo i , V_{ji} é a vulnerabilidade de um elemento j exposto ao perigo i , e C_j é o custo ou valor do objeto j .

Segundo Anbalagan e Singh (1996), um escorregamento pode ocasionar sérios danos tanto em áreas rurais quanto urbanas. Nas áreas rurais podem afetar desde terras improdutivas e florestadas à propriedades agrícolas. Nas áreas urbanas, os impactos sócio-econômicos geralmente são maiores em virtude dos danos sobre as indústrias, escolas, parques, áreas comerciais e residenciais. Conforme os autores, a extensão de um dano dependerá da existência de uma provável área e comunidade a ser afetada. Por exemplo, um grande escorregamento em uma área remota poderá causar danos menores do que um pequeno escorregamento em uma área densamente povoada. Desta forma, a avaliação do risco só deverá ser realizada após a avaliação do tipo de escorregamento provável e seus danos potenciais em função da área de ocorrência.

Dai et al. (2002) citam que qualquer tipo de avaliação e gerenciamento de risco deve levar em consideração os seguintes pressupostos: probabilidade de ocorrência de um escorregamento, comportamento do provável mecanismo de ruptura, risco e vulnerabilidade das pessoas e propriedades frente ao evento adverso, e gerenciamento de estratégias e decisões preventivas e/ou mitigadoras (análise custo-benefício).

Leroi (1997) sugere que devam ser respondidas algumas questões básicas para a avaliação de risco, como: (1) Que fenômeno irá ocorrer? (2) Onde? (3) Quando? (4) Em que direção? (5) Quem e/ou o que será afetado? (6) Quanto custará?

Desta forma, um mapa de risco ideal deverá fornecer informações não só da probabilidade temporal e espacial, mas também sobre a tipologia e o comportamento do fenômeno, a vulnerabilidade dos elementos expostos e os prováveis custos dos danos (Einstein, 1997; Dai et al., 2002).

Entretanto, a elaboração deste mapa é trabalhosa e dispendiosa, pois requer uma constante atualização de grande quantidade de dados, que em muitos casos são difíceis de serem coletados (IUGS Working Group on Landslides, 1997; Leroi, 1997).

Muitas incertezas também estão presentes na definição dos mecanismos de rupturas e das técnicas de avaliação que influenciarão na intensidade e no tamanho das áreas afetadas e, conseqüentemente, na avaliação dos danos sócio-econômicos. Além disso, os mapas de risco possuem uma aplicabilidade temporal limitada, dado que a vulnerabilidade dos elementos e o valor associado aos mesmos apresentam caráter altamente dinâmico, especialmente em áreas sob maior pressão de uso e ocupação (Einstein, 1997; IUGS Working Group on Landslides, 1997; Leroi, 1997; Wong et al., 1997).

2.5 Métodos de Mapeamento de Áreas Susceptíveis

Diversas são as abordagens conceituais, técnicas e metodológicas encontradas na literatura, como as apresentadas por Carrara et al. (1995), Terlien et al. (1995), Guzzetti et al. (1999), Westen et al. (1997), Barredo et al. (2000), Dai et al. (2002), entre outros. Com base nestes autores, os métodos de mapeamento de áreas susceptíveis a escorregamentos são categorizados em heurístico, determinístico e estatísticos.

2.5.1 Método Heurístico

O método heurístico, segundo Westen et al. (1997), é o mais subjetivo dos métodos onde um especialista decide o tipo e o grau de risco para a área em análise, utilizando o mapeamento direto ou indireto. No mapeamento direto o grau de risco tem como base os levantamentos em campo e o mapa geomorfológico detalhado do terreno. A partir destas informações, são definidas unidades comuns (polígonos) com base nas prováveis

causas e fatores de instabilidade (Carrara et al., 1995; Westen et al., 1997; Guzzetti et al., 1999; Barredo et al., 2000). O mapeamento indireto baseia-se em técnicas de integração de dados, como por exemplo a técnica de suporte à decisão AHP (*Analytical Hierarchy Process*), onde o analista determina pesos maiores para as classes e parâmetros mais relevantes (Barredo et al., 2000).

A vantagem deste método é que cada polígono delineado no mapa pode ser avaliado separadamente, baseado nas suas características únicas (Carrara et al., 1995; Barredo et al., 2000; Dhakal et al., 2000). Entretanto, é um método que consome grande quantidade de tempo e depende diretamente da experiência e do conhecimento de quem está avaliando (Barredo et al., 2000).

Devido à grande subjetividade presente, tanto na elaboração do mapa geomorfológico quanto na determinação dos pesos das classes e parâmetros, o mapa de susceptibilidade final apresenta alto grau de incerteza. Além disso, a reprodução do mesmo fica comprometida em função das regras de decisões que podem variar amplamente entre pesquisadores (Carrara et al., 1992; Ardizzone et al., 2002).

2.5.2 Método Determinístico

O método determinístico, conforme Terlien et al. (1995), Westen et al. (1997) e Dai et al. (2002), tem como base os modelos hidrológicos e de estabilidade, que levam em consideração informações detalhadas das encostas baseadas nos princípios de mecânica de solos.

Este método busca eliminar a subjetividade quantificando os graus de risco em valores absolutos, como por exemplo, através do fator de segurança (*Safety Factor*) (Barredo et al., 2000). Este fator é definido, basicamente, pela relação entre as forças de resistência ao cisalhamento e as de tensão cisalhante, onde são mensurados parâmetros como coesão, ângulo de atrito interno, profundidade das camadas de solo, poro-pressão, altura do lençol freático, etc. (Westen e Terlien, 1996; Westen et al., 1997). Na verdade, a maioria dos parâmetros que integram os modelos de estabilidades são obtidos com mensurações em campo e em laboratório (Terlien et al., 1995).

Os modelos de estabilidade são bem aplicados em mapeamentos de grande escala, principalmente com o objetivo de direcionar obras de engenharia em planos de contenção de encostas (Westen et al., 1997).

A grande desvantagem deste método está no alto grau de simplificação, principalmente para mapeamentos em escala média e regional, devido à grande variabilidade dos parâmetros geotécnicos. Desta forma, o desempenho do método depende totalmente da quantidade e da qualidade dos dados coletados (Westen et al., 1997; Fernandes et al., 2001; Dai et al., 2002).

Segundo Dai e Lee (2002), este tipo de abordagem só deve ser empregado onde as condições do terreno são relativamente uniformes e a tipologia dos escorregamentos é bem conhecida e facilmente analisável.

2.5.3 Método Estatístico

O método estatístico, segundo Carrara et al. (1995), Westen et al. (1997) e Guzzetti et al. (1999), tem como princípio a existência de relações entre os fatores condicionantes de instabilização (litologia, cobertura vegetal, uso do solo, formas das encostas, declividade, etc.) e a distribuição dos escorregamentos antigos e recentes na paisagem. A partir da combinação estatística destes fatores são determinados os graus de risco para as áreas livres de escorregamentos, ou seja, assume-se que os fatores que causaram a instabilidade para determinadas áreas correspondam aos mesmos que poderão gerar escorregamentos futuros em outros pontos nas encostas (Dai et al., 2002).

De acordo com Carrara et al. (1995), Chung et al. (1995), Westen et al. (1997), Atkinson e Massari (1998) e Dai e Lee (2002), este método divide-se em duas análises estatísticas principais: a bivariada e a multivariada. Ambas as análises utilizam a frequência ou a densidade de escorregamento por classe para a determinação dos pesos. A diferença básica entre as duas análises resume-se no fato de que a bivariada considera o peso de cada classe e de cada parâmetro de análise utilizando técnicas de inferência, como por exemplo, Lógica Fuzzy e Inferência Bayesiana. Enquanto que a multivariada considera para cada unidade amostral (polígono ou pixel) a presença ou ausência de

escorregamento, gerando uma matriz de dados que é exportada e analisada em um pacote estatístico (regressão múltipla, análise discriminante, etc.).

Fernandes et al. (2001) citam que os critérios e regras de combinação são baseados em fatos, ou seja, padrões mensurados a partir de observações de campo, ao invés da simples experiência do pesquisador.

No entanto, segundo Carrara et al. (1995), Westen et al (1997) e Dai e Lee (2002), a confiabilidade do método também depende da quantidade e da qualidade dos dados. Outros agravantes, como a definição errônea das variáveis independentes (parâmetros geoambientais), podem comprometer a relação custo/benefício do mapa de susceptibilidade final.

2.6 A Participação do Sensoriamento Remoto e do Sistema de Informação Geográfica na Elaboração de Mapas de Susceptibilidade

Atualmente, alguns trabalhos têm buscado comparar as diversas propostas metodológicas quantitativas, com o intuito de obter resultados mais precisos para escalas específicas de trabalho. Dentre estes destacam-se os trabalhos de Carrara et al. (1995), Barredo et al. (2000) e Morrissey et al. (2001) que, respectivamente, analisaram os métodos estatísticos, heurísticos e determinísticos.

Carrara et al. (1995) utilizaram três abordagens estatísticas (análise discriminante, análise discriminante *stepwise* e análise condicional) para a elaboração de mapas de risco nas bacias hidrográficas de Tescio e Carpina na região central da Itália. Barredo et al. (2000) compararam os resultados obtidos com o mapeamento heurístico direto e indireto em escala média na bacia Barranco de Tirajana, localizada na Ilhas Canárias, Espanha. Morrissey et al. (2001) também realizaram uma análise comparativa entre os modelos de estabilidade SINMAP, LISA e ITRM para a previsão de fluxos de detritos (*debris flow*) em Madyson County, Virginia, EUA.

Entretanto, é de suma importância que se realizem novas avaliações e comparações entre os métodos. Para tanto, as técnicas de Sensoriamento Remoto e Sistema de

Informação Geográfica permitem a rápida extração, armazenamento e processamento da informações necessárias para a elaboração dos mapas de inventário e de susceptibilidade a escorregamentos (McKean et al., 1991; McDermid e Franklin, 1994; Carrara et al., 1995; Dikau et al., 1996; Mantovani et al., 1996; Walsh e Butler, 1997; Westen et al., 1997; Carrara et al., 1999).

2.6.1 Sensoriamento Remoto

Segundo Lillesand e Kiefer (1994), o Sensoriamento Remoto (SR) trata da obtenção de informações sobre a superfície terrestre através da análise dos dados adquiridos por sensores (terrestres, aéreos e orbitais) que não estão em contato com o objeto sob investigação. Algumas das aplicações mais importantes do SR, conforme Schowengerdt (1997), são: monitoramento e avaliação ambiental, agricultura, exploração de recursos naturais não-renováveis e mapeamentos em geral (topografia, geomorfologia, uso do solo, etc.).

Brunsdon (1993), Mantovani et al. (1996), Walsh e Butler (1997) e Zinck et al. (2001) comentam que o SR possui excelente aplicabilidade para estudos de detecção e monitoramento das atividades de escorregamentos, que são informações fundamentais para a prevenção deste fenômeno. Segundo McKean et al. (1991), os dados obtidos por SR também podem ser usados para avaliar as conseqüências diretas dos escorregamentos através da identificação e mensuração da área de abrangência do fenômeno. Além disso, é possível mapear os parâmetros condicionantes do fenômeno, como a cobertura vegetal, formas de uso da terra, morfologia das vertentes, etc.

Conforme Dai e Lee (2002) os escorregamentos normalmente apresentam algumas características em comum passíveis de serem identificadas visualmente, como: um ponto de origem, definido pela superfície de ruptura; um rastro de destruição deixado na encosta; e um leque de deposição onde grande parte da massa transportada é depositada (Figura 2.8). Desta forma, utilizando-se fotografias aéreas e imagens de satélite é possível identificar as cicatrizes de escorregamentos, que correspondem principalmente às áreas de desagregação e deposição (McKean, 1991; Mantovani et al., 1996; Zinck et al., 2001).

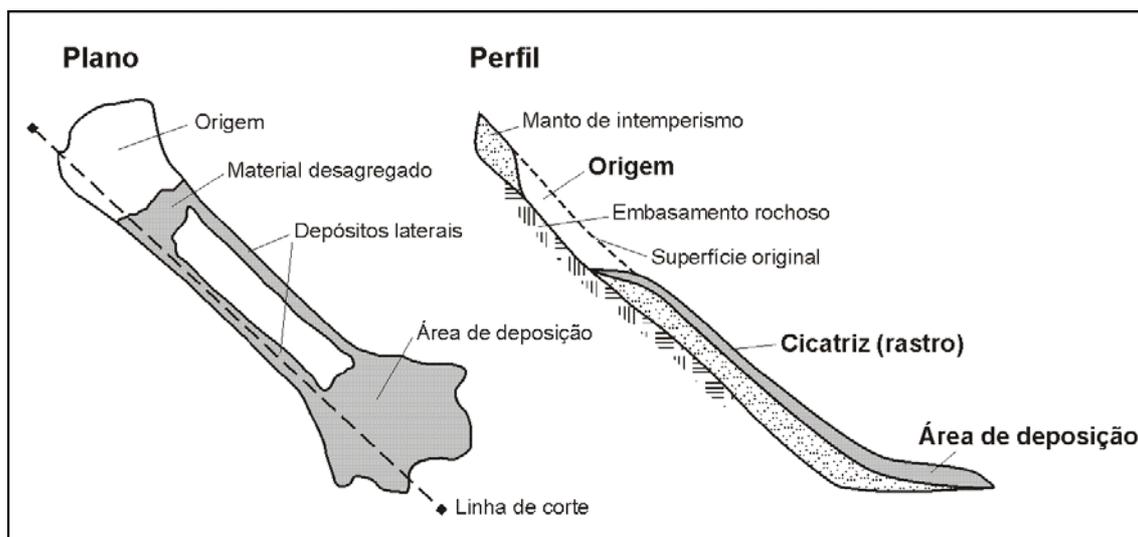


FIGURA 2.8 – Características típicas de um escorregamento.
 FONTE: adaptada de Dai e Lee (2002).

Brunsdén (1993) e Mantovani et al. (1996) citam que, apesar dos benefícios diretos do SR, poucos estudos têm sido realizados com imagens de satélites em função da baixa resolução espacial dos sensores existentes. Até então, o uso de fotografias aéreas tem predominado para a elaboração dos mapas de inventário. Isto demonstra que a aplicabilidade do SR para estudos sobre escorregamentos, tanto em termos de resolução espacial e temporal quanto espectral, não fora ainda avaliada na sua totalidade. Por exemplo, é necessário avaliar o comportamento espectral das cicatrizes buscando informações sobre umidade, tipo de solo, características da vegetação, etc.

Segundo Mantovani et al. (1996), a escala adequada para que se reconheça o tipo e as causas dos escorregamentos deverá ser igual ou maior que 1:25.000. Esta escala de trabalho tem sido alcançada facilmente com levantamentos aerofotogramétricos. Entretanto, utilizando as imagens dos sensores orbitais, como apresentados na Tabela 2.2, só é possível identificar as grandes cicatrizes. Por exemplo, utilizando imagens pancromáticas do satélite SPOT com resolução de 10 m, só poderão ser identificadas feições de escorregamentos maiores que 100 metros (10 pixels).

TABELA 2.2 – Relação entre resolução espacial e tamanho de cicatrizes de escorregamentos passíveis de serem identificadas.

Sensores	Landsat MSS	Landsat TM ETM	Spot XS	ETM PAN	Spot PAN	Foto Aérea 1:50.000	Foto Aérea 1:25.000	Foto Aérea 1:10.000
Resolução espacial (m)	80	30	20	15	10	0,5	0,25	0,10
Alto contraste (m)	800	300	200	150	100	5	2,5	1
Baixo contraste (m)	3.200	1.200	800	600	400	20	10	4

FONTE: adaptada de Mantovani et al. (1996).

Brunsdén (1993) também apresenta uma relação pixel-cicatriz similar. O autor comenta que para uma resolução espacial 20 x 20 m (bandas XS SPOT), seriam necessários 9 pixels para que uma cicatriz pudesse ser diferenciada dos demais alvos presentes na cena.

Mantovani et al. (1996) mencionam que esta relação poderá ser comprometida se não existir um alto contraste entre as cicatrizes e os outros alvos ao redor da mesma. Desta forma, quanto melhor for o contraste entre as cicatrizes e os alvos circunvizinhos, melhor será a identificação das áreas de erosão e deposição, e, conseqüentemente, aumentará a qualidade do inventário a ser realizado.

No entanto, diversas técnicas de processamento de imagens têm sido amplamente utilizadas no sensoriamento remoto com o intuito de melhorar não só a qualidade espectral, mas também a qualidade espacial. Dentre estas destacam-se as técnicas de fusão de imagens.

2.6.1.1 Técnicas de Fusão de Imagens

Teoricamente, as técnicas de fusão podem ser definidas como a combinação de duas ou mais imagens com características espaciais e espectrais distintas, com o intuito de se

obter uma nova imagem (híbrida) com as melhores características das imagens originais. A idéia principal é combinar alta qualidade espectral com espacial (Pohl, 1998; Pohl e Van Genderen, 1998). Estas imagens híbridas podem ser utilizadas para o monitoramento ambiental, planejamento urbano, agricultura, uso e cobertura da terra, geomorfologia, aplicações cartograficas, etc (Carter, 1998; Pohl e Van Genderen, 1998).

Além disso, estas técnicas fornecem outras vantagens, como a manutenção da capacidade de armazenamento de dados no computador, a melhoria da qualidade visual das imagens, o aumento do potencial fotointerpretativo e a diminuição dos custos operacionais na obtenção de dados (Carter, 1998).

Dentre as técnicas mais usadas, destacam-se a transformação Brovey, IHS (Intensity-Hue-Saturation), HSV (Hue-Saturation-Value), PCA (Principal Components Analysis) e a Transformada Wavelet (Carper et al., 1990; Chavez et al., 1991; Garguet-Duport et al., 1996; Pohl, 1998; Pohl e Van Genderen, 1998; Ventura et al., 2002; Li et al., 2002).

a) *Fusão Brovey*

A transformação Brovey é um dos métodos de fusão mais simples onde os valores de NC (níveis de cinza) de cada banda de um conjunto de imagens multiespectrais são divididos pela soma dos NC das n bandas utilizadas no processo. O resultado é então multiplicado pelos NC da banda de melhor resolução espacial, no caso, a banda pancromática. Este método tenta manter a integridade espectral de cada banda incorporando o valor proporcional das bandas antes de serem alteradas pela fusão (Carter, 1998; Pohl e Van Genderen, 1998). A equação 2.2 demonstra como é realizado o processo de fusão (Pohl e Van Genderen, 1998):

$$NC_{Brovey} = \frac{NC_{bi}}{\sum_{i=1}^n NC_{bi}} * NC_{PAN} \quad (2.2)$$

onde, NC_{Brovey} é a imagem resultante com as características espectrais similares às das bandas multiespectrais e com a mesma resolução espacial da imagem de alta resolução.

b) Fusão IHS e fusão HSV

A principal função da transformação IHS é separar a informação espectral nas componentes matiz (*Hue*) e saturação (*Saturation*) e a espacial na componente intensidade (*Intensity*), a partir de uma composição colorida RGB (*Red-Green-Blue*) (Schowengerdt, 1997; Mather, 1999). Crosta (1999) menciona que o sistema IHS descreve a formação de cores muito mais próxima àquela pela qual o sistema visual humano as percebe, apresentando assim, vantagens nítidas em relação ao sistema RGB.

Basicamente, segundo Grasso (1993), Schowengerdt (1997) e Mather (1999), o matiz está associado ao comprimento de onda médio ou dominante da energia refletida ou emitida por um alvo. A componente saturação refere-se à pureza ou à quantidade de luz branca misturada a um matiz. Assim, tanto o matiz quanto a saturação fornecem informações a respeito das cores de um alvo, estando intimamente relacionados à percepção humana de cores (Pohl e Van Genderen, 1998). A componente intensidade representa o brilho total de um alvo, sendo que sua variação numa cena fornece informações sobre a morfologia da superfície (Schowengerdt, 1997; Mather, 1999).

No processo de fusão IHS, uma das aplicações mais freqüentes é a combinação de imagens pancromáticas com multiespectrais de sensores ópticos distintos (Ehlers, 1991). Como exemplo, cita-se o trabalho de Chavez et al. (1991) que realizaram a fusão da banda pancromática do sensor HRV SPOT com as bandas multiespectrais do sensor TM do satélite Landsat 5.

Conforme Pohl e Van Genderen (1998), o processo inicia-se a partir da transformação de uma composição colorida do espaço RGB para o IHS. Posteriormente, é realizada a uniformização radiométrica entre as bandas PAN e I. Substitui-se a banda I pela PAN retornando ao espaço RGB, obtendo-se assim, uma imagem híbrida com as características espectrais da composição colorida e as espaciais da banda pancromática (Figura 2.9).

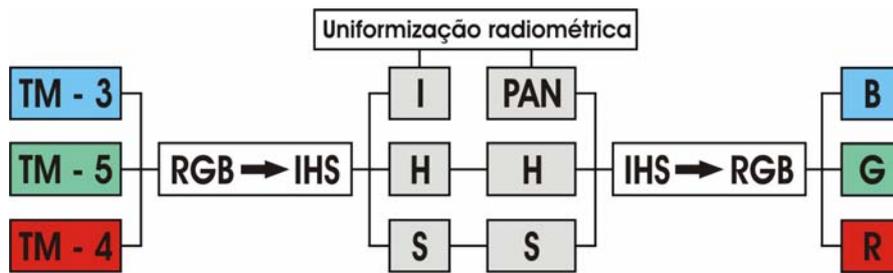


FIGURA 2.9 – Seqüência simplificada do método de fusão IHS.
 FONTE: adaptada de Ehlers (1991).

Um sistema de cor intimamente relacionado ao IHS é o sistema HSV, onde H (*Hue*) é a cor, S (*Saturation*) a saturação e V (*Value*) o valor. A componente V representa o brilho em uma imagem, isto é, os altos valores indicam cores mais brilhantes (Pohl, 1996). O processo de fusão é similar ao método IHS, onde a componente V é substituída por uma imagem de alta resolução espacial (Pohl e Van Genderen, 1998).

c) Fusão PCA

A Análise por Componentes Principais (*Principal Components Analysis – PCA*) tem como função determinar a extensão da correlação existente entre as imagens e removê-la através de uma combinação linear (Pohl, 1998; Pohl e Van Genderen, 1998; Li et al., 2002). Segundo Schowengerdt (1997) e Mather (1999), a alta correlação entre bandas implica em redundância de dados e aumento no tempo de processamento.

As imagens de saída são chamadas de Principais Componentes (PCs), onde as informações são melhor diferenciadas por não estarem correlacionadas. A PC1 irá conter as informações comuns às *n* bandas originais e a PC2 irá conter a feição espectral mais significativa do conjunto. As demais PCs irão conter feições espectrais cada vez menos significantes (Crosta, 1999). Segundo Pohl e Van Genderen (1998), geralmente mais de 90% das informações espectrais ficam contidas nas três primeiras PCs.

Pohl (1998) e Pohl e Van Genderen (1998) apresentam duas modalidades de fusão por componentes principais: a substituição de PCs e a PCA direta. No primeiro caso, a partir de um conjunto de imagens multiespectrais, são geradas as PCs. Posteriormente, na transformação para o espaço RGB a PC1 é substituída por uma imagem de alta

resolução espacial. Salienta-se que antes de realizar a substituição é realizada a uniformização radiométrica entre a imagem de alta resolução e a PC1. No segundo caso, as PCs são calculadas simultaneamente para um conjunto de bandas formadas por imagens multiespectrais e pancromática. Troya (1999) e Marcelino et al. (2003a), aplicaram uma variação do segundo método, que consiste numa correlação pareada entre a banda PAN e as bandas TM. Posteriormente, aplica-se nas primeiras PCs uma transformação inversa para o espaço RGB, obtendo-se a imagem híbrida (Figura 2.10).

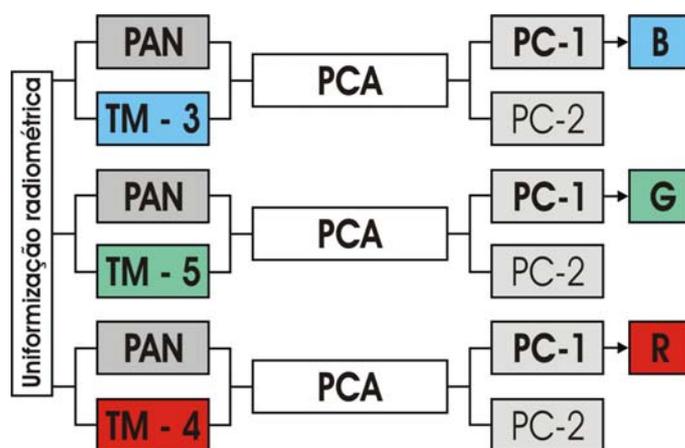


FIGURA 2.10 – Seqüência simplificada do método de fusão PCA.
FONTE: adaptada de Troya (1999).

d) Fusão Wavelet

Garguet-Duport (1996) comenta que a análise de multiresoluções baseadas na teoria Wavelet permite introduzir a idéia de detalhes entre sucessivos níveis de escala ou resolução. A Transformada Wavelet (*Wavelet Transform* – WT) decompõe em sub-bandas de baixas e de altas freqüências, formando novas sub-bandas com os detalhes de cada banda utilizada no processo de fusão. Desta forma, através deste método, a fusão de imagens é realizada pela troca das sub-bandas das imagens de baixa resolução espacial pela de alta resolução em um determinado nível de detalhamento. Dentre os diversos trabalhos produzidos, destacam-se os métodos de fusão de imagens utilizados por Garguet-Duport et al. (1996), Yocky (1996), Li et al. (2002) e Ventura (2002).

Garguet-Duport et al. (1996) aplicam a WT para realizar a fusão entre as bandas multiespectrais e pancromática do sensor HRV do Spot 4 (Figura 2.11). Para este

método, foi realizada inicialmente a uniformização radiométrica da banda PAN em relação às bandas XS1, XS2 e XS3. Conseqüentemente, foram formadas três novas imagens. Aplicou-se assim a WT para a extração de detalhes, decompondo as imagens em uma componente baixa-frequência (LL) e em três altas-frequências (HH, LH e HL). Na componente de baixa-frequência estão contidas as informações espectrais (cores). Nas altas-frequências estão contidos os detalhes verticais, horizontais e diagonais, que correspondem à informação espacial (estruturas). Neste método a decomposição das bandas foi realizada em apenas um nível (20 m), pois a razão entre as resoluções das imagens é da ordem de primeira potência de dois (Ventura, 2002). Posteriormente, foi aplicada uma transformada inversa para a obtenção da imagem híbrida com as melhores informações espectrais e espaciais das imagens originais. Este método é considerado o “método básico”, visto que os demais passaram a utilizar os mesmos princípios, com algumas adaptações para resolver problemas específicos (Ventura, 2002).

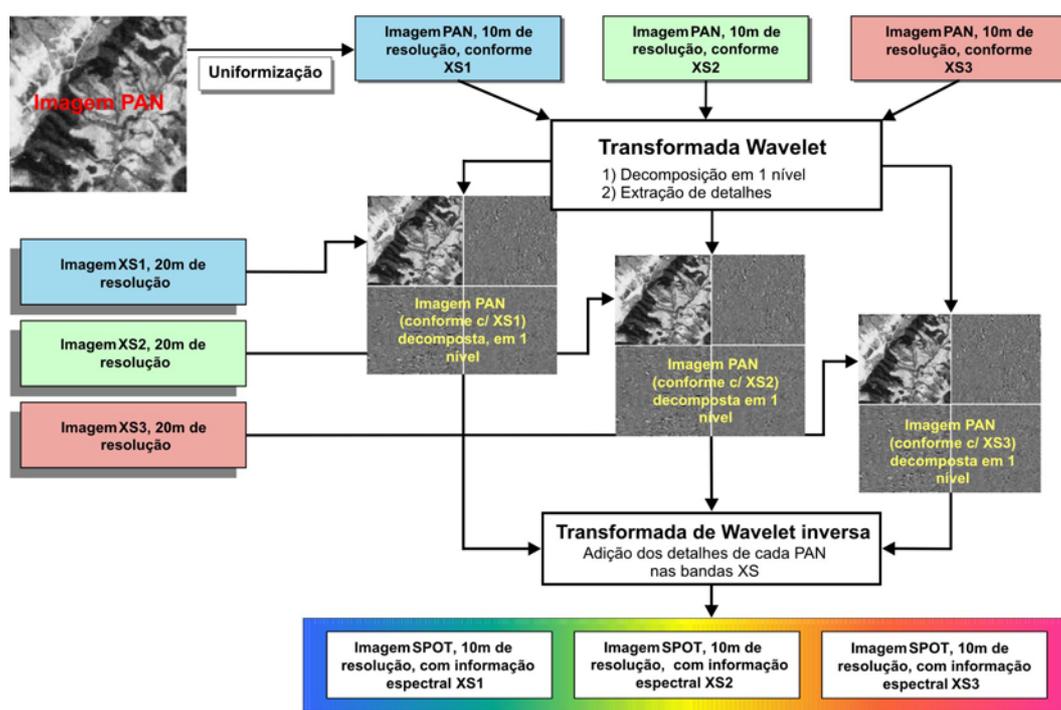


FIGURA 2.11 – Método WT proposto por Garguet-Duport.
 FONTE: adaptada de Garguet-Duport et al. (1996).

Yocky (1996) propôs um método de fusão WT diferente do apresentado por Garguet-Duport et al. (1996). A diferença básica entre eles é a reamostragem das imagens

multiespectrais antes de iniciar o processo de fusão e a obtenção da imagem híbrida pelo método de fusão aditivo. A re-amostragem das imagens multiespectrais e das pancromáticas (já uniformizadas radiometricamente) é realizada com o intuito de que as imagens apresentem o mesmo tamanho de pixels (mesmo número de linhas e colunas). Neste método, as dimensões das imagens devem apresentar valores de potência de dois (2^n). Com relação ao método aditivo, a imagem híbrida é obtida pela soma pixel-a-pixel das sub-bandas de detalhes (HH, LH e HL) das imagens espectrais com as sub-bandas equivalentes oriundas da decomposição da imagem pancromática em um nível desejado (Ventura, 2002).

No método proposto por Li et al. (2002), é incorporada uma nova regra de seleção de coeficientes de detalhes, isto é, ao invés dos valores de NC dos pixels serem somados como no método de Yocky (1996), agora é selecionado o maior valor absoluto em uma janela ao redor do pixel analisado.

Ventura (2002) propõe um novo algoritmo que visa sintetizar as melhores características dos métodos anteriormente citados, como também compensar as deficiências encontradas nos mesmos, como por exemplo: a relação potência de dois do método Garguet-Duport et al. (1996) que impossibilita a decomposição em mais de um nível de refinamento de detalhes; o efeito do “quadriculado” em áreas homogêneas das imagens e o efeito de “serrilhamento” das bordas do método proposto por Yocky (1996); e o efeito de “sombreamento” das bordas do método Li et al. (2002).

Com relação ao problema de dimensionamento das imagens, Ventura (2002) incorporou o processo de reamostragem ao algoritmo de fusão para que as imagens possuam dimensões adequadas para iniciar o processo. Os demais efeitos foram minimizados, através de um novo critério de seleção de coeficientes da decomposição Wavelet. Os valores dos coeficientes foram calculados utilizando a seguinte equação:

$$d_j^S = \max(d_j^{XS}, d_j^P) + (1 - k_j) d_j^{XS} \quad (2.3)$$

onde, d_j^S são os coeficientes das sub-bandas de detalhes da imagem sintética no nível j ; d_j^{XS} são os coeficientes das sub-bandas de detalhes da imagem multi-espectral; d_j^P são os coeficientes das sub-bandas de detalhes da imagem pancromática; e k_j é o coeficiente de correlação entre as sub-bandas de baixa resolução (sub-banda LL) de ambas as imagens no nível j .

Na Figura 2.12 é apresentada uma versão simplificada do método proposto por Ventura (2002). As imagens são decompostas em uma componente baixa frequência (C) e em três altas-freqüências (D, V e H). No nível mais baixo de resolução, a componente baixa frequência da banda pancromática é substituída pela componente similar da banda pancromática. Após, é aplicada a transformada inversa para a obtenção da imagem híbrida com as melhores informações espectrais e espaciais das imagens originais.

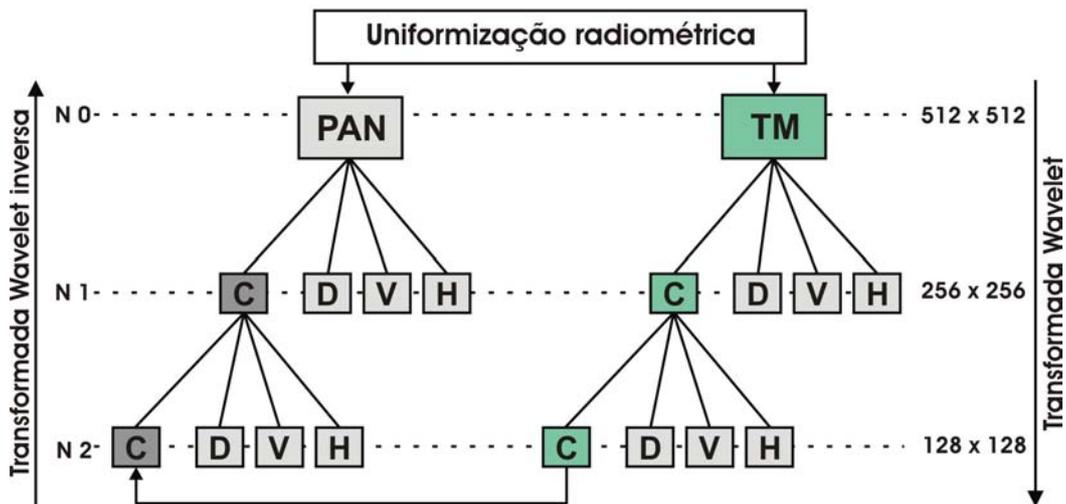


FIGURA 2.12 – Sequência simplificada do método WT proposto por Ventura (2002).
 FONTE: adaptada de Marcelino et al. (2003a).

e) *Exemplo de aplicação de técnicas de fusão para a identificação de escorregamentos*

Marcelino et al. (2003a) avaliaram as técnicas de fusão IHS, PCA e WT proposto por Ventura (2002) para a identificação de cicatrizes de escorregamentos nas encostas da Serra Geral (SC) utilizando imagens ópticas orbitais. A análise foi realizada utilizando as bandas XS1 e XS2 do sensor HRV Spot e as bandas 3, 4 e 5 do sensor TM Landsat. Ressalta-se que, os autores realizaram uma simulação da banda pancromática utilizando

as bandas XS1 e XS2 do sensor HRV, pois não foi possível obter uma banda PAN de 10 m do mesmo sensor com data de aquisição próxima a ocorrência dos escorregamentos. O processo de avaliação foi baseado na interpretação visual, análise estatística e classificação de imagens (MAXVER). Neste estudo, verificou-se que o melhor resultado foi obtido com a técnica WT, pois melhor preservou as características espaciais e espectrais das imagens originais (HRV e TM), acentuando as cicatrizes e as áreas de deposição em relação aos demais alvos na cena (Figura 2.13). Na avaliação estatística, as imagens híbridas WT apresentaram alta correlação espectral com valores acima de 91% em relação às bandas 3 e 5 do sensor TM.

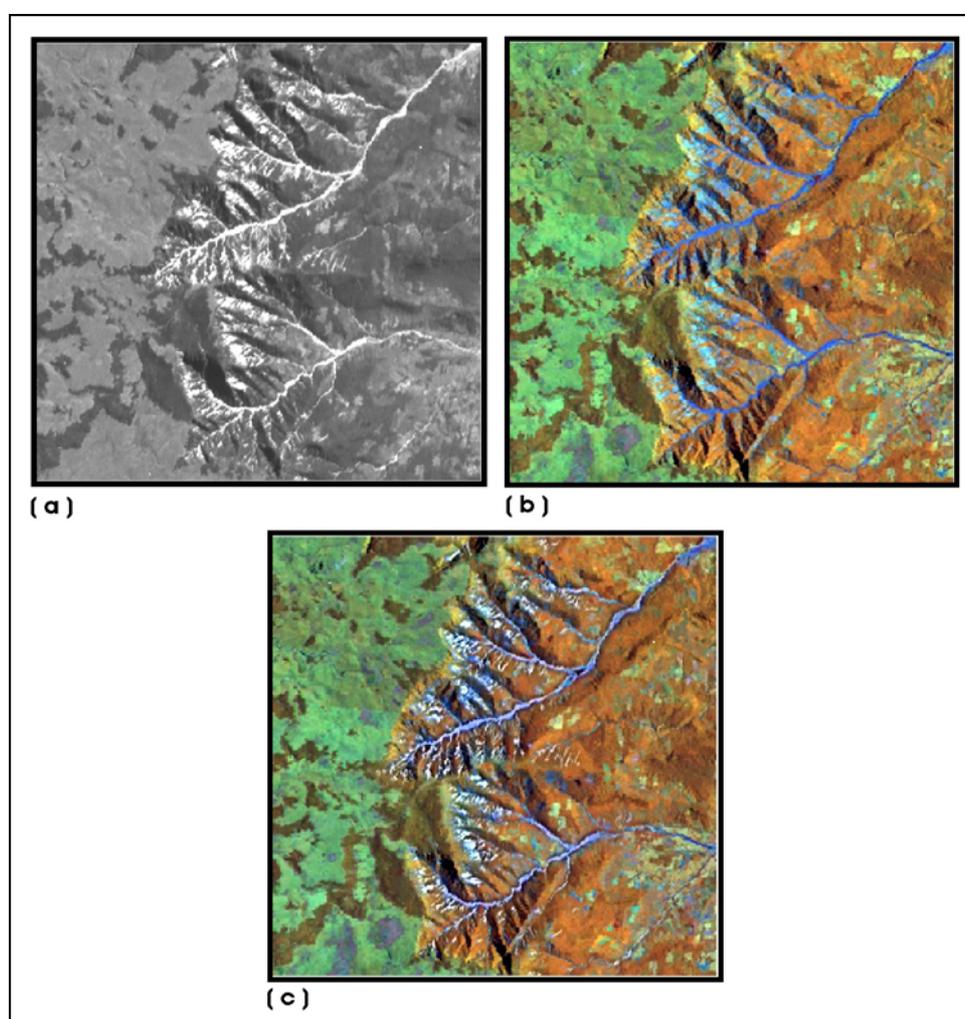


FIGURA 2.13 – Exemplo de fusão WT: (A) banda PAN HRV, (B) composição 453 TM e (C) fusão WT realizada pelo método Ventura (2002).
FONTE: adaptada de Marcelino et al. (2003a).

2.6.2 Sistema de Informação Geográfica

Segundo Câmara e Medeiros (1998), para o tratamento das informações obtidas através do SR, é recomendável a utilização do Sistema de Informação Geográfica (SIG). Esta tecnologia utiliza operações matemáticas e métodos computacionais para tratamento das informações, através de correlações espaciais, temáticas, temporais e topológicas. Dentre as principais utilizações de um SIG, destacam-se: a produção de mapas; ferramenta suporte para análise espacial; ou como um banco de dados geográficos, com funções de armazenamento e recuperação de dados.

Segundo Fernandes e Amaral (1996), de forma simplificada, os SIGs funcionam como um conjunto de facilidades e de instrumentos computacionais para arquivo, recuperação, transformação e apresentação de dados para análise de um determinado fenômeno geográfico. Na literatura, são encontrados diversos trabalhos de identificação e investigação de escorregamentos utilizando SIG, como por exemplo, Terlien et al. (1995), Westen e Terlien (1996), Guzzetti et al. (1999), Westen et al. (2000), Barredo et al. (2001), Clerici et al. (2002), entre outros.

Bonham-Carter (1996) comenta que o propósito final da maioria dos projetos de SIG é a combinação de dados espaciais multi-fontes, a fim de analisar e descrever as interações existentes, elaborar modelos preventivos e fornecer suporte às decisões tomadas por especialistas. Além disso, esta integração contribui para a redução da ambigüidade das interpretações que ocorrem nas análises individuais dos dados (Moreira, 2001). Diversas técnicas têm sido elaboradas para a combinação de mapas a partir de dados já existentes, destacando-se a Inferência Booleana, a Média Ponderada, a AHP e a Probabilidade Condicional (Bonham-Carter, 1996; Câmara et al., 2001).

2.6.2.1 Técnicas de Inferência Geográfica

a) Inferência Booleana

O modelo Booleano, conforme Bonham-Carter (1996), envolve a combinação lógica de mapas binários através de operadores condicionais. Cada mapa utilizado pode ser

entendido como um plano de informação (evidência) e a combinação lógica dos diversos planos dá suporte a uma hipótese ou proposição. Diversas operações são testadas repetidamente para verificar se os critérios satisfazem ou não à hipótese.

A combinação lógica booleana dos mapas ou planos de informação (PIs) em um SIG é diretamente análoga à sobreposição de mapas em formato analógico em uma mesa de luz, tradicionalmente empregado por muitos geocientistas (Bonham-Carter, 1996).

A algebra booleana, segundo Burrough e McDonnell (1998), utiliza para a integração dos dados os ponderadores lógicos “E”, “OU”, “Exclusivo OU (XOR)” e “NÃO” (Figura 2.14). O operador “E” é a intersecção de dois ou mais conjuntos de dados, ou seja, as entidades pertencem simultaneamente aos conjuntos A e B. O operador “OU” é a união dos conjuntos, onde serão unidas em um novo conjunto todas as entidades de A e B. O “XOR” recupera as entidades que pertencem a um conjunto e ao outro, mas não aos dois simultaneamente. E o “NÃO” é o operador da diferença que recupera as entidades que pertencem ao conjunto A, mas não ao B.

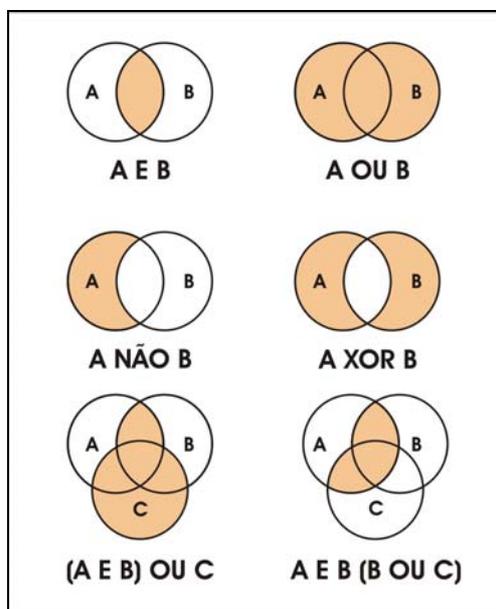


FIGURA 2.14 – Diagrama de Venn mostrando os resultados da aplicação da lógica Booleana para a união e intersecção de dois ou mais conjuntos.
 FONTE: adaptada de Burrough e McDonnell (1998).

Burrough e McDonnell (1998) comentam que apesar de ser um método simples e prático, normalmente não é o mais adequado, visto que aplica às evidências importâncias iguais. O ideal é que as evidências sejam ponderadas em função de suas importâncias relativas. O que não acontece com o método booleano, onde as evidências são tratadas como favoráveis ou não-favoráveis (padrão binário).

b) Média Ponderada

Bonham-Carter (1996) menciona que a média ponderada, também conhecida como *Index Overlay*, é uma das técnicas mais utilizadas em projetos que envolvem análise espacial, pois permite uma maior flexibilidade para se estabelecer os pesos de cada classe e de cada mapa de entrada. Este método é baseado em relacionamento estatístico ou heurístico, ou seja, os relacionamentos espaciais entre as variáveis podem ser realizados a partir de amostras de uma região experimental, ou a partir de um conjunto de classes com seus limiares definidos por um especialista (Câmara et al., 2001).

De acordo com Câmara et al. (2001), cada mapa de entrada receberá um peso diferente dependendo da importância para com a hipótese considerada. Neste caso, cada PI recebe peso distinto, bem como as suas respectivas classes. Como resultado, tem-se um mapa com áreas que expressam um grau de importância relativa através de valores numéricos de saída. A função matemática é expressa por (Bonham-Carter, 1996):

$$\bar{S} = \frac{\sum_{i=1}^n S_{ij} * W_i}{\sum_{i=1}^n W_i} \quad (2.4)$$

onde, S_{ij} é o peso dado para a classe j do plano de informação i ; W_i é o peso do mesmo plano de informação e n é o número de planos de informação.

Segundo Bonham-Carter (1996), uma das grandes vantagens é que o mapa ponderado pode ser ajustado para refletir o julgamento de um especialista ou para definir os pesos de importância para cada classe com base em dados estatísticos. Além do que, este método é muito utilizado para a elaboração de mapas de susceptibilidade, pois permite

uma maior flexibilidade na combinação de mapas do que o método booleano. A maior desvantagem deste método recai provavelmente no caráter linear da ponderação das evidências.

c) *AHP*

Uma das grandes dificuldades no processo de integração de planos de informação em ambiente SIG é a determinação do peso das evidências e do método de combinação dos dados.

Câmara et al. (2001) comentam que, para estes casos, é muito útil dispor de ferramentas que auxiliem na tomada de decisão, ajudando a organizar e estabelecer um modelo racional de combinação de dados. Uma das alternativas mais promissoras de suporte à decisão é o processo analítico hierárquico – *Analytical Hierarchy Process* (AHP).

A AHP é uma teoria com base matemática que permite organizar e avaliar a importância relativa entre os critérios e medir a consistência dos julgamentos (Câmara et al., 2001). Basicamente, os diferentes fatores que influenciam a tomada de decisão são comparados dois-a-dois, e um critério de importância relativa é atribuído ao relacionamento entre estes fatores, conforme uma escala pré-definida (Tabela 2.3).

A partir do estabelecimento de critérios de comparação para cada combinação de fatores, é possível determinar um conjunto ótimo de pesos que podem ser utilizados para a combinação dos diferentes mapas.

TABELA 2.3 – Escala de valores AHP para comparação pareada.

Intensidade de importância	Definição e explicação
1	Importância igual - os dois fatores contribuem igualmente para o objetivo
3	Importância moderada - um fator é ligeiramente mais importante que o outro
5	Importância essencial - um fator é claramente mais importante que o outro
7	Importância demonstrada - Um fator é fortemente favorecido e sua maior relevância foi demonstrada na prática
9	Importância extrema - A evidência que diferencia os fatores é da maior ordem possível.
2,4,6,8	Valores intermediários entre julgamentos - possibilidade de compromissos adicionais

FONTE: Câmara et al (2001).

d) *Probabilidade Condicional*

A Probabilidade Condicional está relacionada com o cálculo da probabilidade de um acontecimento, a partir de informações relevantes já existentes sobre o mesmo, ou seja, baseia-se na idéia de probabilidade *a priori* e *a posteriori* (Bonham-Carter, 1996).

Bonham-Carter (1996), exemplificando tal conceito, comenta que um indivíduo deseja estimar a probabilidade de ocorrência de chuva para o dia seguinte para uma região, onde na média choveu 85 dias por ano. De posse dessa informação, seria razoável admitir que a probabilidade *a priori* de que choverá no dia seguinte é de 80/365. Esta probabilidade poderia ser refinada com a associação de outros dados, como por exemplo, a sazonalidade. Assim, o resultado seria a probabilidade de ocorrer a chuva, dada a estação do ano.

Moreira (2001) menciona que esta nova informação funciona como um fator multiplicativo e representa uma melhora na precisão da informação inicial (probabilidade *a priori*). Sintetizando em uma expressão, temos (Bonham-Carter, 1996):

$$P(chuva | estação) = P(chuva) * Fator_{estação} \quad (2.5)$$

onde, $P(chuva)$ é a probabilidade *a priori*; e $P(chuva|estação)$ é a probabilidade *a posteriori*.

Câmara et al (2001) comentam que outros fatores (evidências) podem ser combinados para refinar ainda mais a estimativa a ser calculada, como por exemplo, a chuva do dia anterior e do dia corrente. Com base na equação 2.5, agora temos a seguinte expressão:

$$P(chuva | estação) = P(chuva) * Fator_{estação} * Fator_{dia-anterior} * Fator_{dia-corrente} \quad (2.6)$$

Bonham-Carter (1996) menciona que a probabilidade *a priori* pode ser estimada por modelos simples de distribuição espacial ou por análises estatísticas multivariadas. Enquanto que, os dados para o cálculo da probabilidade *a posteriori* podem ser obtidos via tabulação cruzada, entre o plano de informação das feições espaciais de interesse e o plano de informação das evidências. Entretanto é necessário que o plano de informação das evidências seja transformado em mapas binários, isto é, classe favorável e não favorável (Bonham-Carter, 1996).

A partir dos mapas binários é realizada a tabulação cruzada entre as evidências e as feições espaciais (Ex: escorregamentos - verdades de campo), obtendo-se uma matriz onde cada célula corresponde à interseção das classes destas variáveis. Estes valores são utilizados na formulação para a obtenção da probabilidade *a posteriori* (Moreira, 2001).

Bonham-Carter (1996) fornece outro exemplo para um melhor entendimento da probabilidade condicional. Considere-se a probabilidade de se encontrar um depósito mineral em uma região (R) que possui uma área de 10.000 km², sendo que já foram encontrados nesta região 200 depósitos (D). Para efeito de análise, cada depósito ocupa uma unidade de área ou célula de 1 km². Se dividirmos a região em unidades

geográficas com área de 1 km^2 , obtêm-se 10.000 unidades. Usando a notação $N(\)$ para representar a contagem de unidades, têm-se: $N(R) = 10.000$ unidades de área e $N(D) = 200$ depósitos com área de 1 km^2 . A densidade média de depósitos conhecidos na região é $N(D)/N(T)$, ou $200/10000=0.02$, assumindo que não mais que um depósito ocorrerá por unidade de célula. O valor 0.02 é a probabilidade de ocorrer um depósito mineral em uma célula de 1 km^2 , escolhida aleatoriamente. Não havendo outras informações disponíveis sobre a área, esta razão $N(D)/N(T)$ pode ser usada como a probabilidade *a priori* $P(D)$ de se encontrar um depósito na região analisada.

Supondo que existam outras informações sobre a área, como um mapa de anomalia eletromagnética, onde 180 dos 200 depósitos conhecidos ocorram dentro da área da anomalia (Figura 2.15a), a probabilidade de se encontrar um depósito será muito maior que 0,02. Assim, esta potencialidade pode ser expressa pela probabilidade condicional (Bonham-Carter, 1996):

$$P(D | B) = \frac{P(D \cap B)}{P(B)} \quad (2.7)$$

onde, $P(D | B)$ é a probabilidade condicional de um depósito D em uma área de anomalia B ; $P(D \cap B)$ é igual à proporção da área total onde ocorre intersecção dos depósitos e anomalia (evidência), ou seja, $P(D \cap B) = N(D \cap B)/N(T)$. O denominador $P(B)$ de modo semelhante equívale a $N(B)/N(T)$, onde $P(B)$ e $N(B)$ são respectivamente a probabilidade e a área da anomalia B . Substituindo na equação 2.7 obtêm-se:

$$P(D | B) = \frac{N(D \cap B)}{N(B)} \quad (2.8)$$

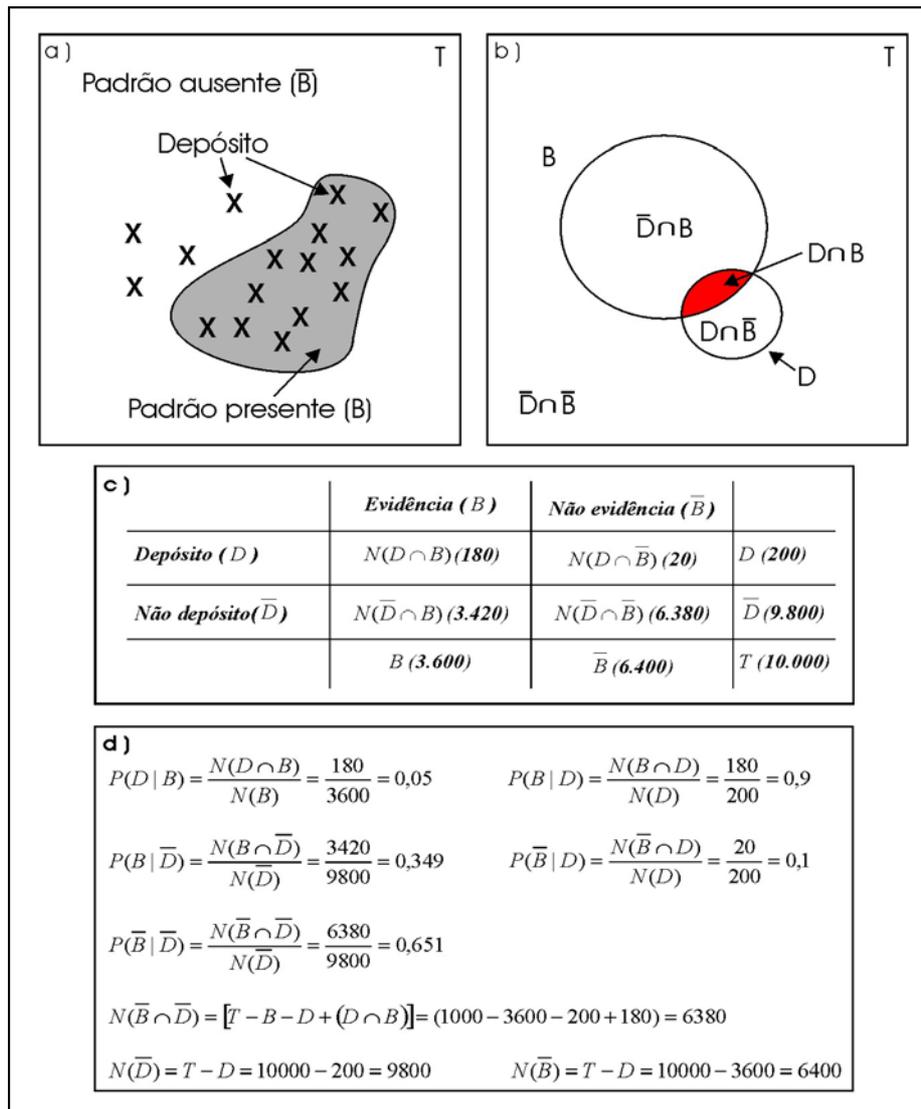


FIGURA 2.15 – Tabulação cruzada e probabilidade condicional para o exemplo fornecido por Bonham-Carter (1996).

FONTE: Moreira (2001).

Na Figura 2.15b o diagrama mostra a situação de sobreposição entre os planos dos depósitos e da anomalia com a área de interseção em vermelho. Utilizando uma tabulação cruzada (Figura 2.15c) é possível obter os resultados, sendo que os depósitos estão representados nas linhas e a evidência na coluna. Já as formulações das probabilidades condicionais com os respectivos resultados são mostrados na Figura 2.15d. Assim, fica claro que a probabilidade condicional dada a evidência é maior que a probabilidade *a priori*, quando considera-se a área total. Por exemplo, $180/3.600 = 0,005$, o que é 2,5 vezes maior do que a probabilidade *a priori*, onde $P(D) = 0,002$.

Desta forma, conclui-se que a chance de sucesso para esta evidência em uma campanha prospectiva é aumentada e a área de pesquisa reduzida de 10.000 km² para 3.600 km² (Bonham-Carter, 1996).

Moreira (2001) cita que o processo de conversão de mapas multi-classes para uma forma binária pode ser efetuada subjetivamente, através do julgamento de um especialista, ou estatisticamente, determinando-se o limiar de corte que maximiza a associação espacial entre a evidência e as ocorrências minerais.

Bonham-Carter (1996) propõe a utilização do Contraste (C_w) como um dos parâmetros possíveis para a definição do limiar de corte. Além de ser um parâmetro estatístico, ele maximiza a correlação espacial entre o mapa de evidências e o mapa de ocorrências. Segundo o autor, este ponderador é obtido para as n classes de cada plano de informação (evidência) através da seguinte equação:

$$C_w = Ln(LS) - Ln(LN) \quad (2.9)$$

onde, C_w é o Contraste; LS é a razão de suficiência; LN é a razão de necessidade; e Ln é o logaritmo. Sendo que LS é expresso pela equação:

$$LS = \frac{\frac{N(D \cap C_n)}{N(D)}}{\frac{N(\overline{D} \cap C_n)}{N(\overline{D})}} \quad (2.10)$$

onde, D é a área de depósito; C_n é a área de uma classe n qualquer; e \overline{D} é o que não é depósito. A razão de necessidade (LN) é obtida pela seguinte expressão matemática:

$$LN = \frac{\frac{N(D \cap \overline{C_n})}{N(D)}}{\frac{N(\overline{D} \cap \overline{C_n})}{N(\overline{D})}} \quad (2.11)$$

onde, \overline{C}_n é a área das demais classes existentes, ou seja, o que não é C_n . Conforme Moreira (2001), LS ou LN são computadas em função da presença ou ausência de evidência para um dado ponto. A condição de suficiência de uma evidência (B) é satisfeita quando a probabilidade de existência do depósito (D) é maximizada ($P(B | D) = \text{máximo}$). A condição de necessidade da evidência é satisfeita quando a probabilidade de não ocorrência do depósito é maximizada com a não existência da evidência ($P(\overline{D} | \overline{B}) = \text{máximo}$).

CAPÍTULO 3

ÁREA DE ESTUDO

3.1 Localização da Área de Estudo

A área de estudo abrange todo o município de Caraguatatuba, localizado no Litoral Norte do Estado de São Paulo (Figura 3.1).

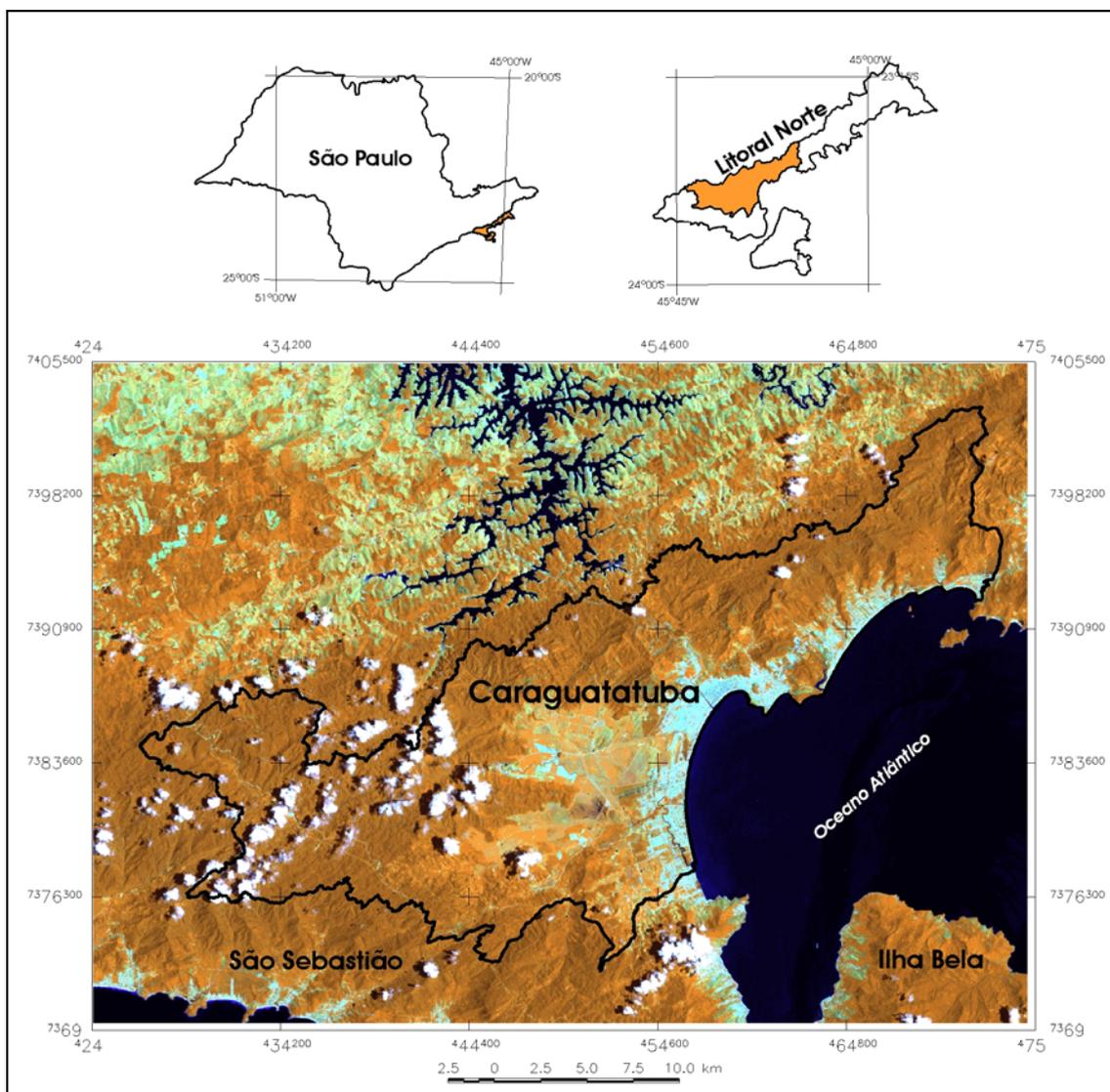


FIGURA 3.1 – Localização da área de estudo sobre uma composição colorida 453 ETM+/Landsat.

3.2 Caracterização Geoambiental

O município de Caraguatatuba é constituído por diferentes domínios morfoestruturais, apresentando aspectos geomorfológicos bem distintos entre si. Dentre as formas de relevo que se observa nesta região destacam-se as áreas de Planalto, as escarpas da Serra do Mar e a Planície Litorânea.

a) *Planalto*

A região de planalto é predominantemente caracterizada pela forma mamelonar, que constitui uma topografia piramidal, com topos arredondados, sendo difícil a distinção da linha de cumeeada (Guerra e Guerra, 2001). Segundo Cruz 1974, esta área é também caracterizada por grandes amplitudes topográficas existentes entre as serras e as planícies fluviais e baixos terraços. Acompanhando o alinhamento das cristas dos morros e dos corpos intrusivos, predomina na região a orientação E-NE e N-NE. A drenagem que se desenvolve nas cabeceiras dos cursos d'água são do tipo dendrítica, sendo que nos baixos e médios vales ocorrem várzeas largas e retilíneas, caracterizando-se por drenagem do tipo treliça (Cruz, 1974; SMA, 1998).

Quanto à formação geológica predominam na área do planalto os granitóides e migmatitos, com espesso manto de regolito e detritos grosseiros. O solo típico dessa região é do tipo Latossolo Vermelho e Amarelo, caracterizado pela homogeneidade e textura arenosa média quartzosa, principalmente nas áreas de relevo suave. Esses terrenos foram classificados como de alta suscetibilidade à erosão por sulcos, ravinas e voçorocas (IPT, 2000). Segundo SMA (1998), estes processos erosivos estão relacionados mais aos usos intensos do solo, como expansão urbana e obras viárias, do que ao desmatamento propriamente dito.

A cobertura vegetal é dominada pela Mata Atlântica permanecendo ainda bem preservada, principalmente nas encostas mais elevadas e fundos de bacia de recepção. As áreas modificadas pela ação antrópica possuem uso de atividades agropastoris, intercalando-se com a presença de capoeiras baixas e rala (Cruz, 1974).

b) *Serra do Mar*

A Serra do Mar é a unidade geomorfológica mais expressiva da área de estudo, resultante de dobramentos, reativações de falhas e remobilizações de blocos crustais, apresentando assim um quadro morfológico relacionado ao tectonismo regional e de fases erosionais sucessivas. Suas vertentes são classificadas em dois tipos: escarpas festonadas e escarpas com espigões digitados. As escarpas festonadas localizam-se na porção norte do município, apresentando-se com alta densidade de drenagem e vertentes com perfis retilíneos, que se desfazem em anfiteatros separados por espigões com topos angulosos em direção à planície litorânea. Já as escarpas com espigões digitados constituem a maior parte do município e são caracterizadas pela presença de vales fechados, drenagem de alta densidade (padrão paralelo-pinulado) e vertentes com perfis retilíneos, associados aos espigões lineares subparalelos com topos angulosos (IPT, 2000).

A geologia da Serra do Mar é composta basicamente por granitóides e migmatitos. Dentre os granitóides verifica-se os gnaisses graníticos e rochas graníticas em decomposição e com textura variada (IPT, 2000). Segundo Cruz (1974) as rochas ígneas que formam as escarpas da serra possuem alto grau de metamorfismo, sobretudo o gnaisse facoildal, a biotita-gnaisse, o oligoclásio-gnaisse, o leptito e o granulito, intercalados com faixas de migmatitos e maciços graníticos intrusivos. As rochas da parte alta da serra são intensamente dobradas e falhadas, sendo que, observa-se na descida uma grande raiz sinclinal com perturbações locais (Cruz, 1974). Segundo esta autora, as intrusões e falhas, em geral, concordam em paralelismo com a direção da xistosidade dos gnaisses.

Como resultado do tipo de rocha que compõe a Serra do Mar, aliado ao elevado grau de intemperismo do solo, predominam os solos do tipo Cambissolo e Latossolo Vermelho Amarelo, com textura média/argilosa, e alguns fragmentos de espodossolo e neossolo quartzarênicos.

A vegetação que constitui a Serra do Mar pertence ao Bioma Mata Atlântica, subdividida em duas formações florestais principais: mata de encosta, que possui

árvores altas com dossel descontínuo; e mata de altitude, que caracteriza-se por ocorrer acima de 1100 m (Okida, 1996). A ação antrópica nesta área limita-se às baixas encostas associadas a declividades não tão elevadas.

c) *Planície costeira*

A Planície Costeira na região de Caraguatatuba é formada pela planície marinha e flúvio-marinha. Este tipo de planície é originada por processos litorâneos, com a ação construtiva do mar e de rios, formando superfícies aplainadas por agração. A ação fluvial, formando depósitos aluviais, constitui uma das principais características desta superfície, visto que a ação marinha limita-se a orla marítima atual. Essas áreas são praticamente planas, com pequenas altitudes e baixa densidade de drenagem (SMA, 1998).

Esta planície é formada por sedimentos continentais, provenientes de depósitos coluvionais, sedimentos flúvio-lagunares, sedimentos marinhos da formação Cananéia, com predominância de areia, silte e argila, e depósitos litorâneos correspondentes as praias atuais. O solo predominante dessa região é do tipo neossolo, com elevado grau de antropização. As áreas formadas por depósitos aluviais, misturados aos coluviais, geram solos mais aproveitáveis se comparados com os outros tipos de depósitos desta região (SMA, 1998).

Dentre as áreas da planície costeira que possuem problemas mais sérios quanto ao seu uso são os terraços aluviais, que possuem alta suscetibilidade às inundações, recalques excessivos e diferenciais por adensamento de argilas moles e turfosas, assoreamento e erosão fluvial (SMA, 1998). Grande parte desta planície é ocupada por área urbana e pastagem, apresentando alguns fragmentos de vegetação, mangue alterado, restinga, etc. Segundo Okida (1996) ocorre extração de areia nesta região com portos de pequeno porte, como também exploração de saibro na base das encostas da serra e dos morros isolados.

3.2.1 Clima da Área de Estudo

As características geomorfológicas da região contribuem diretamente na variação local dos elementos climáticos, principalmente devido às variações altimétricas entre as unidades geomorfológicas descritas anteriormente. Apesar dessas particularidades nas diferentes unidades, a atuação em escala sinótica dos sistemas atmosféricos na região, apresentam-se de forma única para todo o município. Desta forma, para entender os diferentes índices de precipitação pluviométrica e de outras variáveis meteorológicas é fundamental o estudo integrado dos fatores dinâmicos e estáticos da região, como a circulação atmosférica e os obstáculos montanhosos, respectivamente (Conti, 1975).

Segundo Monteiro (1973), o clima do município de Caraguatatuba é controlado predominantemente pelas massas equatoriais e tropicais. A massa de ar tropical, representada pelo anticiclone semi-fixo do Atlântico Sul, possui normalmente temperaturas medianas a elevadas e forte umidade específica, devido à intensa evaporação marítima (Nimer, 1991). O domínio desta massa de ar na região mantém a estabilidade do tempo com predomínio de Sol. Já a massa equatorial caracteriza-se por temperaturas muito elevadas, podendo ser seca, quando formada sobre o continente, e úmida quando formada sobre o Oceano Atlântico Equatorial. Além disso, esta região também sofre constantemente com a influência de sistemas frontais provenientes do sul, que ocasionam instabilidades de tempo provocando chuvas. Este trecho do litoral paulista está sujeito a menor participação das massas polares (30 a 40% de participação anual), conseqüentemente, é menos influenciado pelas temperaturas baixas, se comparado aos setores central e meridional deste litoral (Monteiro, 1973).

Além dos sistemas atmosféricos que atuam na região, outro fator de grande influência no clima de Caraguatatuba são as altitudes variadas das escarpas da Serra do Mar. De acordo com Monteiro (1973), estas são responsáveis pela acentuada pluviosidade mesmo no inverno. As vertentes da serra neste trecho do litoral possuem maior influência na intensificação das chuvas relacionadas com a massa tropical atlântica do que com os sistemas atmosféricos provenientes de sul. Isto ocorre devido ao alinhamento paralelo das escarpas da Serra do Mar com a linha da costa, contribuindo

para os elevados índices pluviométricos a barlavento das encostas (sentido oceano-continente). Os sistemas frontais provenientes do sul, geralmente carregados de precipitação pluviométrica, desencadeiam valores mais elevados de chuvas a barlavento das serras do litoral paulista que possuem seus alinhamentos opondo-se a trajetória destes sistemas. Como a enseada de Caraguatatuba está localizada a sotavento dessas serras (efeito sombra), a mesma possui valores anuais de precipitação mais baixos se comparados com outras áreas do litoral paulista (IPT, 2000).

Em Caraguatatuba, os índices pluviométricos mais altos encontram-se nas altitudes mais elevadas das encostas, registrando valores de até 3.000 mm, enquanto que na planície os valores alcançam até 1.700 mm de precipitação anual. Dentre os períodos sazonais, o verão é o que concentra o maior volume de precipitação pluviométrica, tendo janeiro como o mês mais chuvoso. A primavera também caracteriza-se por elevados índices de pluviosidade, ficando as estações do outono e inverno com os volumes mais baixos de precipitação. Desta forma, os meses que registram os menores índices pluviométricos são maio, junho, julho e agosto. Os meses que possuem mais do que 50% de dias com chuva são outubro, dezembro e janeiro, enquanto que as maiores frequências de chuva acumulada em três dias igual ou superior a 120 mm ocorrem nos meses de novembro, janeiro, fevereiro e março (SMA, 1998).

CAPÍTULO 4

MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Materiais

4.1.1 Dados Cartográficos

Grande parte dos planos de informações (PIs) utilizados no processo de inferência espacial foram extraídos do banco de dados geográficos (BDG) construído por Crepani e Medeiros (2001). Os dados utilizados são apresentados na Tabela 4.1. Ressalta-se que algumas outras variáveis foram extraídas a partir das informações já existentes no BDG, como por exemplo, o mapa de declividade obtido a partir das curvas de nível do mapa hipsométrico.

TABELA 4.1 – Principais planos de informação do banco de dados geográficos utilizado.

PI	Dado	Formato
Hipsométrico	Curvas de nível (20 m)	Vetorial
Drenagem	Cursos d'água	Vetorial
Rede viária	Arruamentos	Vetorial
Limite municipal	Limite municipal	Vetorial
Geologia	Litologias	Vetorial
Lineamentos	Estruturas geológicas	Vetorial
Geomorfologia	Unidades geomorfológicas	Vetorial e matricial
Pedologia	Tipos de solos	Vetorial e matricial
Uso e cobertura da terra	Uso e cobertura da terra	Vetorial e matricial

FONTE: Crepani e Medeiros (2001).

As bases cartográficas do IBGE e do IGGSP também foram consultadas para o planejamento das saídas a campo e auxílio nas análises dos mapas temáticos. Na Tabela 4.2 são apresentadas as especificações das cartas topográficas utilizadas.

TABELA 4.2 – Cartas topográficas utilizadas.

Carta	Folha	Escala	Proj./DH/DV*	Data
Maresias	SF-23-Y-D-V-4	1:50.000	UTM/CA/IMB	IBGE (1973)
Caraguatatuba	SF-23-Y-D-VI-1	1:50.000	UTM/CA/IMB	IBGE (1986)
Pico do Papagaio	SF-23-Y-D-V-2	1:50.000	UTM/CA/IMB	IBGE (1974)
Salesópolis	SF-23-Y-D-V-3	1:50.000	UTM/CA/TOR	IGGSP (1971)
Paraibuna	SF-23-Y-D-II-4	1:50.000	UTM/CA/IMB	IBGE (1973)
Natividade da Serra	SF-23-Y-D-III-3	1:50.000	UTM/CA/IMB	IBGE (1974)
Ubatuba	SF-23-Y-D-III-4	1:50.000	UTM/CA/IMB	IBGE (1973)

* DH – Datum Horizontal; DV – Datum Vertical; UTM – Universal Transverse Mercator; CA – Córrego Alegre/MG; IMB – Imbituba/SC; TOR – Torres/RS.

Foram utilizados também os mapas pedológico, geológico, geomorfológico e carta de isoietas anuais (1961/1990) elaborados pelo IPT (2000) na escala 1:250.000, para auxiliar no processo de análise da distribuição espacial das ocorrências de escorregamentos na área de estudo.

4.1.2 Dados de Sensoriamento Remoto

Neste trabalho foram utilizadas duas imagens de satélite, com datas de aquisição próximas, com o intuito de diminuir a influência do tempo sobre os elementos da paisagem. Segundo Pohl e Genderen (1998), esta variação dos elementos da paisagem pode comprometer significativamente a avaliação e o resultado do processo de fusão de imagens. Na Tabela 4.3 estão detalhadas as características das imagens utilizadas.

TABELA 4.3 – Características das imagens de satélite utilizadas.

Sensor/Satélite	Órbita/Ponto	Bandas	Data de coleta
HRV/SPOT 4	718/397	Pancromática	09/06/1999
ETM+/Landsat 7	218/076	1, 2, 3, 4, 5 e 7	17/12/1999

4.1.3 Equipamentos e Softwares

4.1.3.1 Equipamentos

- Workstation Sun Ultra; PC IBM 300 GL Celeron; GPS Garmin 12 XL e March II.

4.1.3.2 Softwares

- GPS TrackMaker®; SPRING 3.6.03; ENVI 3.5; e CorelDRAW 10.

Além destes, foi utilizado um software desenvolvido por Ventura (2002) para a realização das fusões de imagens pelo método Transformada Wavelet.

4.2 Métodos

A pesquisa foi desenvolvida em duas etapas distintas. A primeira etapa, conforme Figura 4.1, relaciona-se à definição da escala de trabalho e seleção do método de fusão mais adequado para a identificação de cicatrizes de escorregamentos utilizando imagens ópticas orbitais.

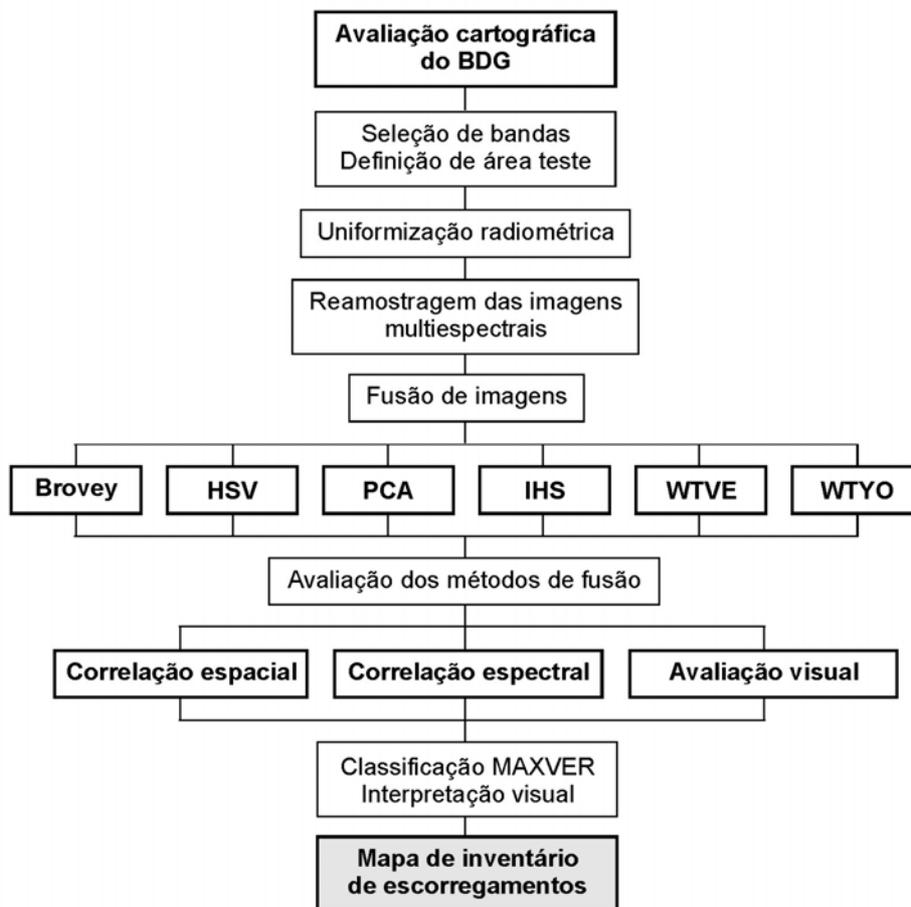


FIGURA 4.1 – Fluxograma da primeira etapa de trabalho.

Na segunda etapa, conforme Figura 4.2, os escorregamentos foram correlacionados com as variáveis geoambientais, para a devida ponderação das mesmas e suas respectivas classes. Com estes dados, foram aplicadas diversas técnicas de inferência geográfica com o intuito de selecionar o método mais adequado para a elaboração de mapeamentos de áreas susceptíveis a escorregamentos.

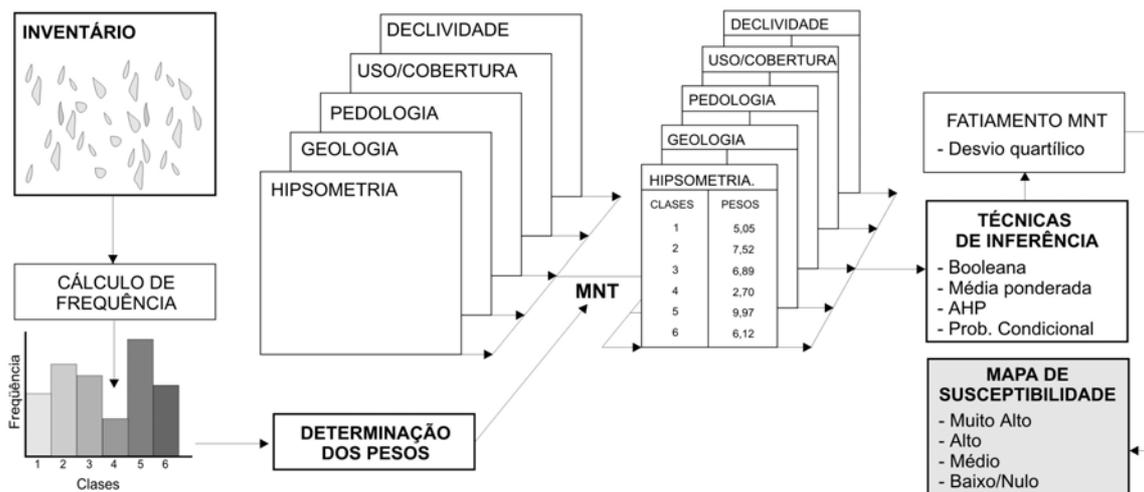


FIGURA 4.2 – Fluxograma da segunda etapa de trabalho.

4.2.1 Avaliação da Precisão Cartográfica do Banco de Dados Geográficos

A correta extração de informações e definição da escala de trabalho, utilizando banco de dados geográficos (BDG), depende diretamente da qualidade geométrica das imagens orbitais e da base cartográfica que o constituem; pois, a partir destas, é gerada a maioria dos mapas temáticos que irão permitir as análises necessárias para cada tipo de objeto estudado. Desta forma, avaliou-se a qualidade cartográfica do banco de dados construído por Crepani e Medeiros (2001) para o município de Caraguatatuba.

Inicialmente, com o auxílio de cartas topográficas e da imagem PAN SPOT, foram selecionados pontos de teste para averiguar a magnitude dos erros geométricos dos dados vetoriais e raster contidos no referido banco. Os pontos de teste, 14 no total, foram escolhidos em função da rápida identificação nas cartas e na imagem, do fácil acesso em campo e, principalmente, da boa distribuição geográfica na área de estudo (Figura 4.3).

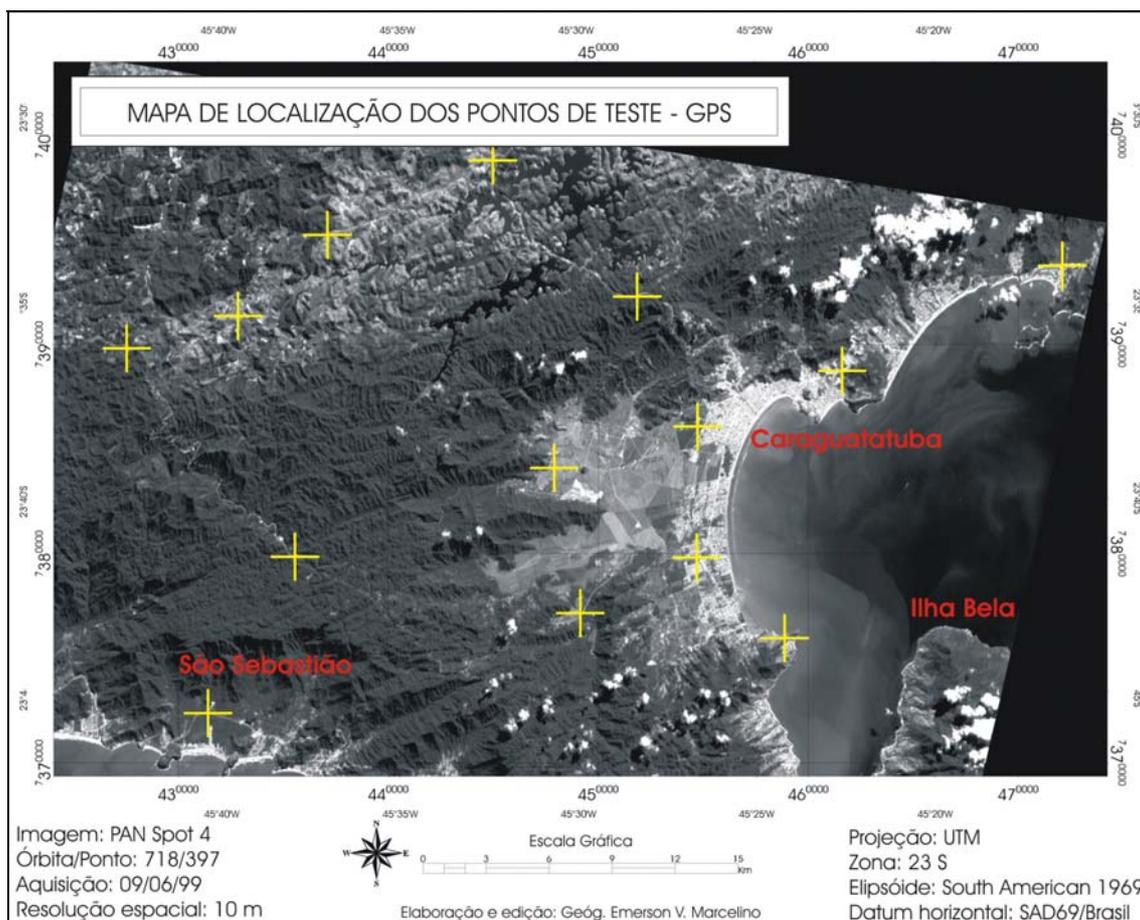


FIGURA 4.3 – Localização e distribuição dos pontos de teste para a avaliação cartográfica do banco de dados geográficos.

Em campo, foram realizadas as medições das coordenadas geográficas utilizando os GPSs com antena externa. As coordenadas geográficas (Lat/Long) foram coletadas com tempo de medição de 4 minutos para cada ponto. Além disso, os valores do Erro de Posição Estimado ou EPE (*Estimated Position Error*) foram tomados e avaliados durante o processo de tabulação dos dados. Este erro fornece o valor aproximado de deslocamento de um ponto, ou seja, em uma circunferência o EPE corresponderia ao valor do raio. O EPE varia em função da quantidade e distribuição dos satélites e da qualidade do sinal recebido (Albuquerque, 2003).

Posteriormente, as coordenadas foram transformadas no GPS TrackMaker® para o sistema de referência do banco de dados, isto é, UTM (*Universal Transverse Mercator*) com datum planimétrico SAD69.

No SPRING, os pontos de teste foram identificados na imagem PAN SPOT e medidas as coordenadas dos mesmos para a realização da avaliação geométrica. A precisão planimétrica foi avaliada através do Erro Médio Quadrático ou RMSE (*Root Mean Square Error*) (McGwire, 1996; Wilkie e Finn, 1996). Basicamente, este método fornece uma medida do desvio dos valores calculados em relação aos valores originais para toda a carta. O RMSE é calculado pela seguinte expressão:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [(\Delta X_i)^2 + (\Delta Y_i)^2]}{n}} \quad (4.1)$$

onde, ΔX e ΔY são as diferenças entre as coordenadas verdadeiras (GPS) e as observadas (PAN HRV) após o registro para o ponto i ; e n é o número total de pontos avaliados. Para os 14 pontos de teste selecionados, também foi calculado o erro de posicionamento (EP) associado aos mesmos. O EP é dado por:

$$EP = \left[(X_o - X_r)^2 + (Y_o - Y_r)^2 \right]^{1/2} \quad (4.2)$$

onde, X_r e Y_r são as coordenadas reais e X_o e Y_o são as coordenadas observadas para um ponto qualquer. Após a tabulação e cálculo do RMSE, os dados foram confrontados com a legislação cartográfica brasileira, para a definição da escala de trabalho.

4.2.2 Seleção das Bandas Multiespectrais para a Identificação de Escorregamentos

Na literatura são poucos os trabalhos que utilizam imagens ópticas orbitais para a identificação de escorregamentos. Em sua maioria, os inventários são realizados em campo ou utilizando fotografias aéreas. Assim, para a seleção das bandas e composições coloridas, foram consultados alguns destes trabalhos, principalmente os que utilizaram imagens dos sensores da série Landsat (Tabela 4.4).

TABELA 4.4 – Trabalhos sobre identificação de escorregamentos utilizando imagens ópticas orbitais dos satélites da série Landsat.

Sensores	Bandas	Comp. Color.	Referências
MSS	5 e 7*	----	Sauchyn e Trench (1978)
TM	3 e 7	321	Florenzano (1993)
TM	2 e 3	542	Walsh e Butler (1997)
TM	2, 3 e 7	473	Sestini (2000)
ETM	----	321	Estrada et al. (2001)
TM	3 e 7	453	Marcelino et al. (2003a)

* As bandas 5 e 7 do sensor MSS correspondem às bandas 3 e 4 do TM e ETM.

Na Tabela 4.4 é possível notar que, dentre as bandas mais usadas para a identificação de cicatrizes de escorregamentos, destacam-se as bandas 3 e 7. A banda TM 3 localiza-se na porção do visível no espectro eletromagnético, correspondendo à faixa espectral do vermelho (0,63 – 0,69 μm), enquanto que a banda TM 7 encontra-se na faixa do infravermelho médio (2,09 – 2,35 μm). Ambas são bastante apropriadas para a diferenciação solo/vegetação em função do alto contraste existente entre estes alvos nestas faixas do espectro (Figura 4.4) (Schowengerdt, 1997).

Com relação às composições coloridas (Tabela 4.4), não houve predomínio de uma em particular. Pode-se notar, no entanto, que a maioria das composições foi realizada com a participação das bandas do visível (2 e 3) e do infravermelho próximo (4).

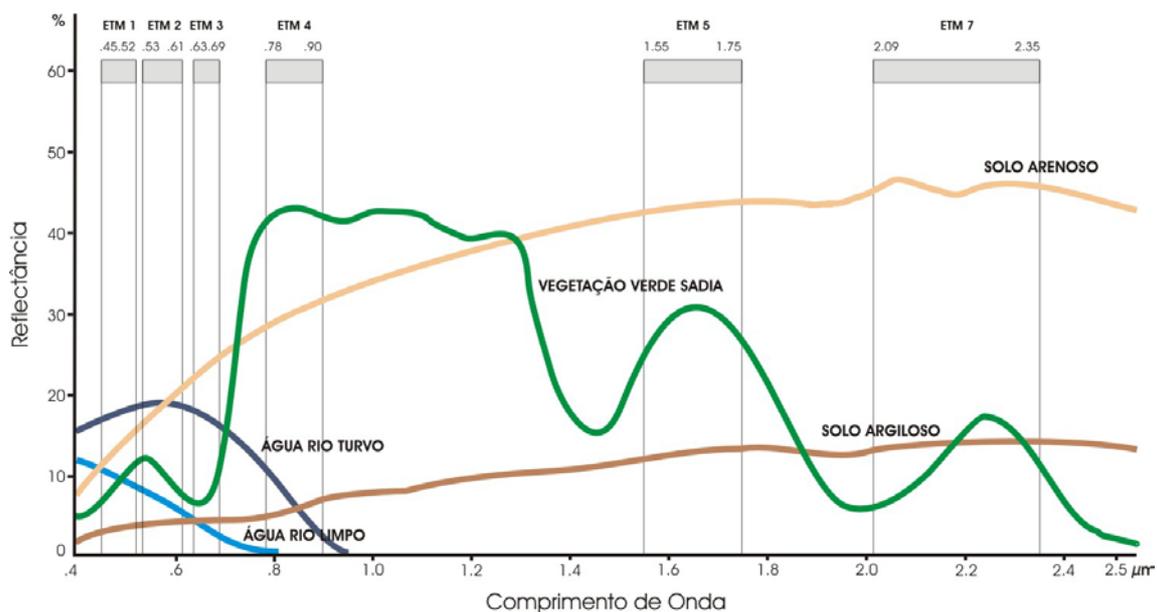


FIGURA 4.4 – Comportamento espectral de alvos e bandas do sensor ETM+.
 FONTE: adaptada de Bowker et al. (1985) e Mather (1999).

A utilização destas bandas vem ao encontro das observações realizadas por Florenzano (1993) e Sestini (2000) na identificação de escorregamentos nas encostas da Serra do Mar (SP). Segundo Florenzano (1993), as bandas 3 e 7 destacaram significativamente as feições de cicatrizes, devido às grandes diferenças na resposta espectral entre estas e as áreas com vegetação densa, representadas por níveis de cinza claros e escuros, respectivamente. Marcelino et al. (2003a) também encontraram resultados semelhantes nas encostas da Serra Geral (SC), apontando estas bandas como as melhores na identificação de escorregamentos.

Sestini (2000) também verificou que as composições coloridas, com as bandas do visível e do infravermelho próximo e médio, foram as que melhor discriminaram as feições erosivas, atividades antrópicas e setores cobertos por densa vegetação. O autor cita que a composição ETM 473 mostrou-se mais apropriada para a discriminação das cicatrizes de escorregamentos. Apesar de Florenzano (1993) ter considerado a composição TM 321 como a melhor na discriminação de feições erosivas, a autora também destaca a importância da composição TM 453, principalmente por salientar a morfologia, as áreas úmidas e a rede de drenagem.

Assim, para a realização do inventário de deslizamentos utilizando técnicas de fusão de imagens, foram selecionadas as bandas ETM 3, 4 e 5. Salienta-se que estas bandas, com exceção da correlação entre as bandas 3 e 5, apresentaram uma baixa correlação entre si, não acarretando em redundância de informações (Tabela 4.5). Com base na literatura apresentada, optou-se pela composição 453 (RGB) tanto para a identificação das cicatrizes quanto para a caracterização geográfica da área de estudo.

TABELA 4.5 – Matriz de correlação entre as bandas ETM utilizadas.

Bandas	3	4	5
3	1,000	0,099	0,886
4	0,099	1,000	0,381
5	0,886	0,381	1,000

4.2.3 Seleção da Área Teste para Avaliação dos Métodos de Fusão de Imagens

Com o intuito de avaliar e selecionar o melhor método de fusão para realizar o inventário de escorregamentos, foi necessário recortar as imagens. Diminuiu-se, assim, o tempo de processamento e a quantidade de dados, eliminando também as áreas escuras nos cantos das imagens em função da rotação da mesma durante o processo de registro.

As imagens foram recortadas em potência de 2 (2^n), de forma que o número de pixels nas linhas e colunas fossem iguais. Este procedimento facilita o processo de fusão com Transformada Wavelet no aplicativo computacional desenvolvido por Ventura (2002). O recorte foi de 256 x 256, 512 x 512 e 768 x 768 pixels para as imagens ETM (30 m), PAN ETM (15 m) e PAN HRV (10 m), respectivamente.

O principal critério adotado para a seleção da área de teste foi à diversidade de alvos (Figura 4.5). A área englobou a planície litorânea, onde se destacam as áreas de pastagem e de ocupação urbana, e as encostas da Serra do Mar, onde se evidenciam os escorregamentos, contrastando com a densa cobertura vegetal, morfologia do terreno e a Rodovia SP-99 (Rodovia Tamoios).

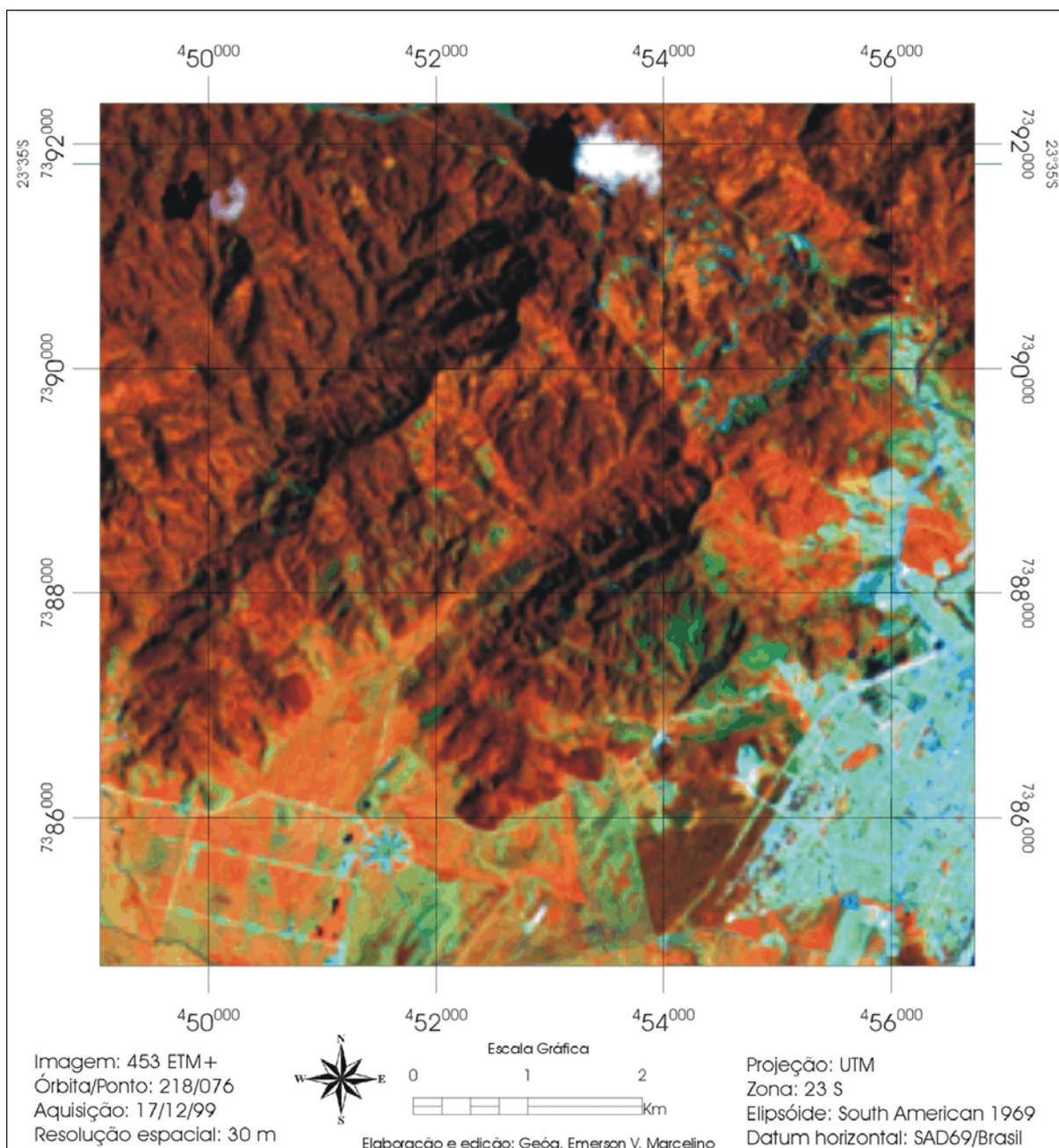


FIGURA 4.5 – Área teste para avaliação dos métodos de fusão.

4.2.4 Uniformização Radiométrica

A uniformização radiométrica consiste numa transformação linear dos níveis de cinza de uma imagem em relação à outra, para que estas se assemelhem espectralmente.

Schowengerdt (1997) menciona que, nos processos de fusão, a imagem de alta resolução deve ser uniformizada radiometricamente em relação a uma imagem referência de baixa resolução, pois a qualidade do produto final está fortemente condicionada pela correlação radiométrica existente entre as imagens a serem fundidas.

O processo de uniformização foi realizado através de uma operação aritmética linear, onde os valores de média e variância de uma imagem foram homogenizados, utilizando a seguinte equação:

$$C = g * A + off \quad (4.3)$$

onde, C e A são as imagens resultante e de entrada, respectivamente; g é o ganho e off é o offset. Para a uniformização de uma imagem pancromática em relação a uma imagem multiespectral, os valores de ganho (g) foram obtidos a partir das seguintes transformações:

$$\sigma_M^2 = \sigma^2(Pan * g + off) \quad (4.4)$$

$$\sigma_M^2 = \sigma^2(Pan * g) + \sigma^2(off) \quad (4.5)$$

Como a variância de uma constante é igual a zero, a equação (4.5) pode ser simplificada para,

$$\sigma_M^2 = \sigma^2(Pan) * g^2 \quad (4.6)$$

assim,

$$g = \sqrt{\frac{\sigma_{Pan}^2}{\sigma_M^2}} \quad (4.7)$$

onde, σ_{Pan}^2 é a variância da pancromática e σ_M^2 é a variância da imagem multiespectral. Para o cálculo do offset (off) é utilizada a seguinte transformação matemática:

$$\mu_M = \mu_{Pan} * g + off \quad (4.8)$$

$$off = \mu_M - \mu_{Pan} * g \quad (4.9)$$

onde, μ_M é a média da multiespectral e μ_{Pan} é a média da imagem pancromática. Após, foram substituídos os valores de ganho e offset na equação (4.3) para a transformação radiométrica da imagem pancromática (A).

Este procedimento foi adotado para uniformizar a banda PAN HRV e PAN ETM com as bandas 3, 4 e 5 ETM na realização das técnicas de fusão PCA, WTVE e WTYO. Ressalta-se que, para os métodos de fusão Brovey e HSV, não houve a necessidade de realizar tais cálculos, visto que estes procedimentos são realizados automaticamente no processo de fusão no software ENVI.

Na Tabela 4.6 são apresentados os valores de média e variância das imagens originais e, na Tabela 4.7, os das bandas pancromáticas após a uniformização radiométrica e os valores de ganho e offset utilizados no processo.

TABELA 4.6 – Estatísticas das imagens originais.

Bandas	Média	Variância
PAN HRV	72,8	1351,2976
PAN ETM	66,02	136,6561
3	48,17	516,1984
4	92,75	233,1729
5	88,13	674,4409

TABELA 4.7 – Estatística das imagens PAN uniformizadas e os respectivos valores de ganho e offset utilizados no processo de uniformização radiométrica.

Bandas	Média	Variância	Ganho	Offset
PAN HRV 3	47,74	514,92	0,61806311	3,17500544
PAN HRV 4	92,53	236,64	0,41539717	62,509086
PAN HRV 5	87,8	675,47	0,70647443	36,6986616
PAN ETM 3	47,62	501,53	1,94354149	-80,1426091
PAN ETM 4	92,52	234,33	1,30624465	6,51172797
PAN ETM 5	87,53	646,3	2,22155689	-58,5371856

Para a realização da fusão IHS, realizou-se a uniformização entre as bandas PAN e a componente I obtida a partir da composição 453 ETM. Na Tabela 4.8 e Tabela 4.9 são apresentados os valores de média e variância das imagens originais e transformadas, respectivamente, além dos valores de ganho e offset.

TABELA 4.8 – Estatística das imagens originais.

Bandas	Média	Variância
PAN HRV	72,8	1351,2976
PAN ETM	66,02	136,6561
I	73,06	337,22

TABELA 4.9 - Estatística das imagens PAN uniformizadas em relação a componente I e os respectivos valores de ganho e offset utilizados no processo.

Bandas	Média	Variância	Ganho	Offset
PAN HRV I	72,58	334,79	0,49955253	36,6925761
PAN ETM I	72,25	336,33	1,57087689	-30,6492923

A uniformização radiométrica foi inicialmente realizada para as imagens recortadas (área teste). Posteriormente, foi aplicado o mesmo processo de uniformização nas

imagens pancromáticas degradadas, utilizadas para a avaliação dos métodos de fusão, e para as imagens que englobam toda a área de estudo.

4.2.5 Reamostragem das Imagens Multiespectrais

Devido às limitações dos aplicativos utilizados e dos métodos de fusão PCA e WTYO, foi necessário realizar uma reamostragem das bandas multiespectrais em relação às bandas pancromáticas HRV e ETM, ou seja, as bandas ETM (30 m) foram reamostradas para 10 e 15 m, respectivamente. Este processo foi realizado no software ENVI, sem que fossem alteradas as estatísticas das imagens multiespectrais originais.

As imagens recortadas e reamostradas foram utilizadas para todos os métodos de fusão, a fim de padronizar o processo evitando a geração de resultados tendenciosos na avaliação dos mesmos.

4.2.6 Avaliação dos Métodos de Fusão

Neste trabalho foram testados seis métodos de fusão de imagens visando selecionar o melhor para a identificação de cicatrizes de escorregamentos: Brovey, HSV, PCA, IHS, WTVE e WTYO. Estes métodos foram aplicados para a fusão PAN HRV + 453 ETM (HRV/ETM) e a fusão PAN ETM + 453 ETM (ETM/ETM), conforme etapas descritas no item 2.6.1.1.

4.2.6.1 Avaliação da Qualidade Espacial

A avaliação da qualidade espacial foi baseada na correlação entre os detalhes existentes na imagem híbrida e na imagem de alta resolução original. Este teste foi proposto por Zhou et al. (1998) e Li et al. (2002) e consiste na extração de detalhes utilizando um filtro Laplaciano 3x3, expresso por:

$$FL = \begin{Bmatrix} -1 & -1 & -1 \\ -1 & +8 & -1 \\ -1 & -1 & -1 \end{Bmatrix} \quad (4.10)$$

O filtro Laplaciano é um filtro passa alta não direcional que visa eliminar as feições de baixa frequência, acentuando as de alta frequência. Conseqüentemente, realça as transições entre regiões espectralmente diferentes nas imagens (transições abruptas). Estas transições podem ser expressas como bordas, linhas ou manchas (Mather, 1999). Na Figura 4.6, nota-se que os arruamentos (alta frequência) foram destacados dos demais alvos da cena (baixa frequência). Assim, é possível verificar que método de fusão melhor preserva as informações espaciais, que correspondem basicamente as transições abruptas presentes em uma cena.

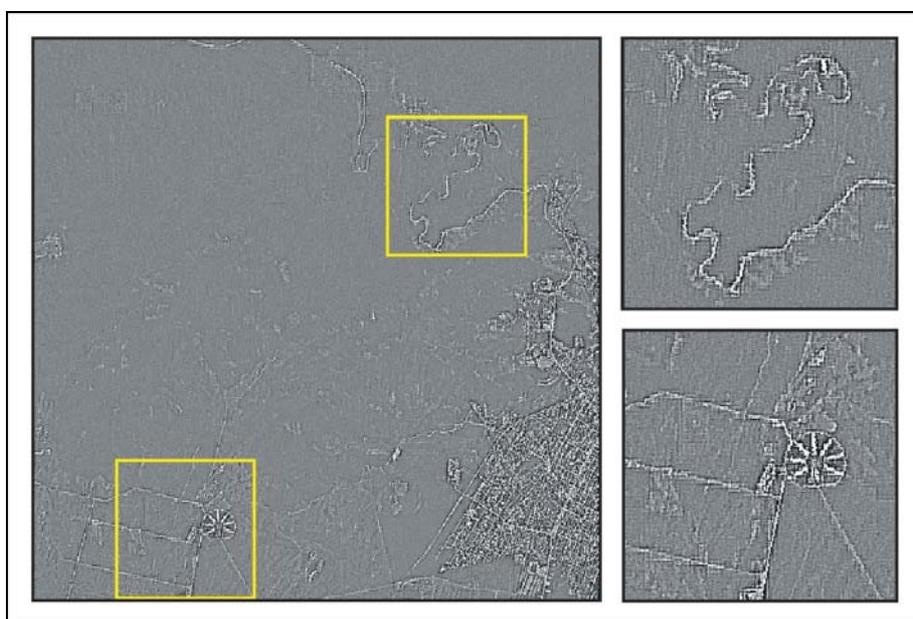


FIGURA 4.6 – Exemplo de imagem PAN HRV filtrada com filtro Laplaciano.

Assim, após a filtragem das bandas PANs e das bandas fundidas, tem-se duas novas imagens contendo os detalhes espaciais, que foram correlacionadas.

4.2.6.2 Avaliação da Qualidade Espectral

Para avaliar a qualidade espectral de cada método de fusão, usaram-se as imagens sintéticas na mesma resolução espacial das imagens multiespectrais originais. Desta forma, antes de realizar as fusões, as bandas pancromáticas tiveram que ser degradadas para a mesma resolução espacial das bandas multiespectrais. A fusão entre as imagens

degradadas é considerada como uma fusão simulada para efeito de avaliação (Ventura, 2002).

Para o processo de simulação, foi utilizado um filtro de degradação calculado de acordo com o método proposto por Banon (1990). Conhecendo-se os valores de IFOV e EIFOV das imagens originais, é possível projetar um filtro digital para gerar as imagens simuladas a partir das originais. Os valores de IFOV e EIFOV utilizados neste trabalho foram obtidos por Banon e Fonseca (2001) para o sensor HRV SPOT e por Storey (2001) para o sensor ETM+ (Tabela 4.10).

TABELA 4.10 – Parâmetros IFOV e EIFOV dos sensores HRV SPOT e ETM Landsat.

Sensor	IFOV (δ)	EIFOV (x)	EIFOV (y)
PAN HRV	10	12,31	14,78
PAN ETM	15	24,10	24,10
ETM	30	41,90	41,90

Após realizar os cálculos para simular as bandas pancromáticas, obtiveram-se os filtros de degradação e o número de vezes que os mesmos são alicados as imagens:

a) Simulação PAN HRV (30 m)

$$F_D = 4 * \begin{Bmatrix} 0,0760 & 0,1296 & 0,0760 \\ 0,1179 & 0,2010 & 0,1179 \\ 0,0760 & 0,1296 & 0,0760 \end{Bmatrix} \quad (4.11)$$

b) Simulação PAN ETM (30 m)

$$F_D = 2 * \begin{Bmatrix} 0,0336 & 0,1161 & 0,0336 \\ 0,1161 & 0,4011 & 0,1161 \\ 0,0336 & 0,1161 & 0,0336 \end{Bmatrix} \quad (4.12)$$

Neste processo também foi realizada a uniformização radiométrica das PANs simuladas (30 m) em relação as bandas 3, 4 e 5 ETM (30 m). Geradas as imagens híbridas, foi

avaliada a qualidade espectral das mesmas através de análises estatísticas comparativas. Para tanto, foram calculados a média, a variância, o desvio padrão e o coeficiente de variação (CV).

Os resultados estatísticos obtidos para cada método de fusão foram comparados com os das imagens originais através do cálculo da distância euclidiana para um espaço tri-dimensional. Além de hierarquizar os resultados de cada fusão em relação aos valores originais, este método fornece a idéia da distância existente em relação aos valores estatísticos das imagens originais (Figura 4.7) (Mather, 1999)

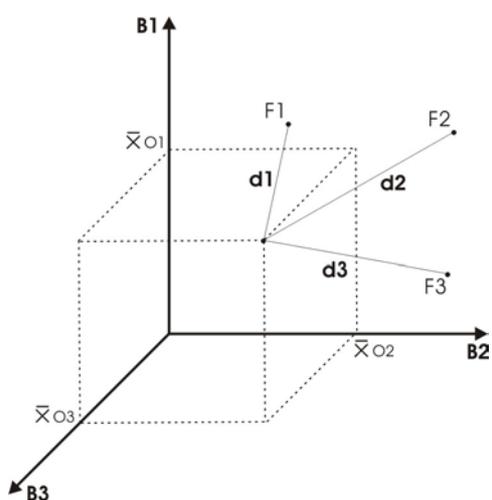


FIGURA 4.7 – Exemplo de distância euclidiana entre a média das bandas originais e a média das bandas sintéticas de três métodos de fusão.

O cálculo da distância euclidiana é realizado utilizando a seguinte expressão matemática (Mather, 1999):

$$d_{ho} = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_{hi} - x_{oi})^2} \quad (4.13)$$

onde, d_{ho} é a menor distância existente entre uma estatística qualquer de uma imagem híbrida (x_{hi}) em relação a de uma imagem original (x_{oi}). Para este trabalho, foi calculada a distância euclidiana para a média, o desvio padrão e o coeficiente de variação.

4.2.6.3 Avaliação Visual

O terceiro método de avaliação proposto foi uma avaliação visual realizada por dezoito especialistas em sensoriamento remoto com formação na área de Ciências da Terra (geógrafos, geólogos, engenheiros florestais, agrônomos, biólogos, etc). Neste teste foram avaliadas somente as fusões realizadas entre a imagem PAN HRV e 453 ETM.

Para cada especialista foi apresentada uma planilha em papel de alta qualidade com as composições coloridas 453 de cada método de fusão (Figura 4.8). Estas composições foram realizadas no ENVI, aplicando uma mesma ampliação linear de contraste. Ao todo foram confeccionadas seis planilhas, com seis configurações distintas. A planilha *A* apresentava as mesmas imagens que a *B*, no entanto, para evitar qualquer tendenciosidade nos resultados, realizava-se um giro nas imagens híbridas no sentido horário (1 imagem por giro). Isto foi realizado para cada nova planilha, completando um novo ciclo a cada seis giros. Ao final, em função do número de especialistas, foram realizados três ciclos completos.

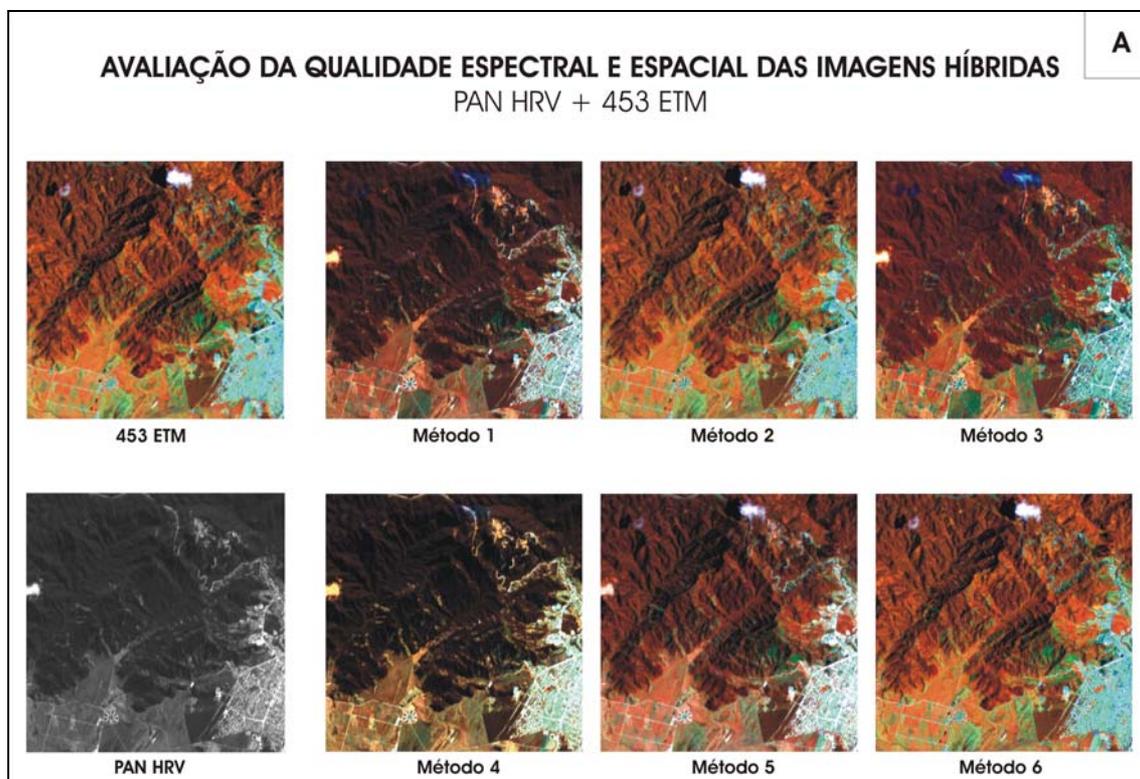


FIGURA 4.8 – Exemplo de planilha utilizada no processo de avaliação visual.

Salienta-se que, para cada especialista, além das planilhas, foi entregue também uma ficha explicativa onde era detalhado todo o processo de avaliação. Basicamente, as imagens originais eram comparadas às diversas imagens que representavam cada método de fusão. Cada método avaliado receberia uma nota de 0 a 10, ou seja, quanto maior o conceito, melhor o método. As etapas do processo foram as seguintes:

- Comparação das características espectrais das composições coloridas 453 dos seis métodos de fusão com a 453 ETM;
- Comparação das características espaciais das composições coloridas 453 ETM dos seis métodos de fusão com a PAN HRV;
- E, tendo como referencial de análise as comparações anteriores, foi realizada uma avaliação do potencial fotointerpretativo dos métodos de fusão com relação aos diversos alvos presentes na cena.

Ao final, as notas foram tabuladas e normalizadas para N (0,1) e comparadas estatisticamente. Ressalta-se que houve necessidade de normalizar os dados devido aos diferentes escalonamentos de notas existentes.

4.2.7 Confeção dos Mapas Temáticos

Além dos PIs já existentes no banco de dados geográficos construídos por Crepani e Medeiros (2001), conforme Tabela 4.1, foram elaborados diversos mapas temáticos que são descritos nos próximos itens. Vale ressaltar que todos os mapas temáticos utilizados neste trabalho foram gerados em ambiente SIG no software SPRING.

4.2.7.1 Elaboração do Mapa de Inventário de Escorregamentos

A maioria dos mapas de inventário é elaborado através da interpretação visual de fotografias aéreas e imagens de satélite para a identificação dos escorregamentos (Brunsden, 1993; Mantovani et al., 1996; Temesgen et al., 2001). No entanto, Ardizzone et al. (2002) comentam que, por ser uma operação difícil e subjetiva, grande

quantidade de erros podem ser inseridos no processo comprometendo os mapas gerados a partir do inventário.

Desta forma, Marcelino et al. (2003a), com o intuito de diminuir a subjetividade presente nos inventários, testaram três classificadores de imagens para a identificação de cicatrizes de escorregamentos. As imagens fundidas por Transformada Wavelet foram classificadas utilizando classificadores pixel a pixel (MAXVER) e por região (ISOSEG e Bhattacharyya). Os autores concluíram que o melhor resultado foi obtido com o classificador MAXVER, pois, por utilizar informações espectrais individuais de cada pixel, possibilitou identificar até mesmo pequenas cicatrizes. Ao contrário dos classificadores por região, que por levarem em conta os parâmetros estatísticos de um agrupamento de pixels, mascararam as pequenas feições, incluindo-as em outras classes de alvos.

Além disso, uma das vantagens de se utilizar o classificador supervisionado MAXVER está na participação direta do usuário no processo de tomada de decisão, ou seja, o usuário pode selecionar as amostras de treinamento e também definir o número de classes. Diferentemente da classificação não-supervisionada, onde cada pixel da imagem é associado a uma classe, através de algoritmos de agrupamento, sem o devido conhecimento prévio do usuário (Schowengerdt, 1997; Mather, 1999). No entanto, em relação à classificação supervisionada, Schowengerdt (1997) recomenda que o usuário tenha um bom conhecimento da área a ser classificada, visto que as amostras devem ser obtidas de áreas homogêneas e representativas da imagem.

Neste contexto, tendo como base o trabalho de Marcelino et al. (2003a), optou-se por utilizar o classificador supervisionado MAXVER (Máxima Verossimilhança) para a classificação da imagem híbrida resultante do método de fusão selecionado.

a) *Classificação da imagem híbrida IHS*

Inicialmente, no software SPRING, foi realizada a fusão HRV/ETM utilizando o método IHS, definido no processo de avaliação. Para tanto, foi aplicado o mesmo processo de uniformização radiométrica descrito no item 4.2.4.

Após a interpretação visual preliminar, definiram-se sete conjuntos de alvos para a classificação: Mata (cobertura vegetal arbórea e arbustiva-arbórea), Pastagem (cobertura herbácea, gramíneas nativas e implantadas), Urbana (área associada a alta densidade de edificações, estradas e solo nu), Escorregamento (feições erosivas geralmente associadas a ervas e gramíneas), Água (corpos aquosos e cursos d'água), Nuvem e Praia.

Para cada classe foram coletadas as amostras de treinamento. Com relação à quantidade ideal de amostras, Mather (1999) recomenda um número mínimo de $30p$ pixel por classe, onde p é o número de bandas espectrais utilizadas. Conseqüentemente, foi necessário obter conjuntos de amostras maiores que 90 pixels, conforme requerido para classificar a imagem IHS (3 bandas).

As amostras foram avaliadas com o intuito de verificar as que apresentaram maior confusão, para poder redefinir as classes levantadas e eliminar as mais problemáticas. Esta avaliação foi realizada de forma automática no software SPRING, através da construção de uma matriz de erro, onde foi possível obter diversos índices estatísticos: desempenho geral, confusão média, abstenção média e coeficiente Kappa. Segundo Congalton e Green (1999), o coeficiente Kappa é uma técnica estatística muito usada para avaliar a precisão de mapas obtidos de dados de sensoriamento remoto. Uma das grande vantagens deste coeficiente é que considera todos os elementos da matriz e não apenas aqueles que se situam na diagonal principal. O Kappa pode ser obtido através da seguinte equação:

$$K = \frac{Po - Pc}{1 - Pc} \quad (4.14)$$

onde, Po é a exatidão global da classificação, dada por:

$$Po = \frac{\sum_{i=1}^c nii}{N} \quad (4.15)$$

onde, N é o número total de amostras, n_{ii} são os elementos da diagonal principal e c é o número de categorias informacionais presentes na matriz de erro; e P_c é obtido por:

$$P_c = \frac{\sum_{i=1}^c P_{i.} * P_{.i}}{N^2} \quad (4.16)$$

onde, $P_{i.}$ é a somatória das linhas e $P_{.i}$ é a somatória das colunas.

Antes de realizar a classificação propriamente dita, foi necessário definir o limiar de aceitação, dado em porcentagem, com o qual calcula-se uma distância mínima entre as regiões pertencentes à mesma classe das amostras de treinamento. Conforme já avaliado por Marcelino et al. (2003a), o limiar de aceitação adotado foi de 100%. Este limiar garantiu que a imagem fora classificada sem rejeição de nenhum pixel, mesmo para os que apresentaram as menores probabilidades de pertencer a uma ou a outra classe qualquer.

A partir da análise da matriz de erro e do resultado do coeficiente Kappa, foi realizada uma reclassificação da imagem, com o objetivo de destacar as feições de escorregamento em relação aos demais alvos presentes na cena. Assim, as classes Mata, Pastagem e Urbana foram associadas, passando a se chamar Outros, em função da confusão existente com a classe Escorregamento. As classes Nuvem e Praia também foram associadas, formando a classe Nenhuma. As únicas que não foram alteradas foram a Escorregamento e Água.

Para a identificação das cicatrizes de escorregamentos foi utilizada a imagem fundida pelo método IHS (HRV/ETM) e a imagem classificada pelo MAXVER. Os escorregamentos eram identificados visualmente na imagem IHS e comparados com o resultado da classificação, que estava acoplada à mesma. Se em ambos os casos fossem classificados como escorregamentos, estes eram então marcados, associando-os a uma coordenada geográfica.

O mapa de inventário foi construído associando o PI dos escorregamentos com os do limite da área de estudo, das estradas e da imagem classificada MAXVER.

Com os dados do inventário foram construídos também dois planos de informação no formato vetorial: um contendo a maior parte dos escorregamentos para correlacionar com os parâmetros geoambientais e ponderar as classes dos mesmos; e o outro, contendo 1/5 dos escorregamentos para avaliar a qualidade dos mapas de susceptibilidade finais. Ressalta-se que para este último PI, os escorregamentos foram selecionados de maneira aleatória. Posteriormente, em função da realização da tabulação cruzada com os demais PIs (parâmetros geoambientais), ambos foram exportados para o formato matricial, com resolução de 10 m (pixel) e escala 1:10.000.

4.2.7.2 Modelo Numérico de Terreno (MNT)

Segundo Felgueiras (2001), um MNT é uma representação computacional da distribuição de um fenômeno espacial que ocorre em uma determinada área da superfície terrestre. Através do MNT é possível armazenar dados altimétricos, elaborar mapas de drenagem, de declividade e de orientação das encostas, realizar modelagem de processos hidrológicos e álgebra de mapas, entre outros (Burrough e McDonnell, 1998).

Basicamente, um MNT é representado por equações analíticas ou por uma rede de pontos denominados como grade. No SPRING, o modelo é criado na forma de uma grade de pontos regulares e irregulares (Felgueiras, 2001).

A grade de ponto regular, destaca-se por ser adequada para a representação de informações geofísicas do terreno e para operações como visualização 3D (Figura 4.9). Outra vantagem é que facilita o manuseio e a conversão dos dados de entrada (temáticos) para os dados de saída (numéricos) (Câmara et al., 2001).

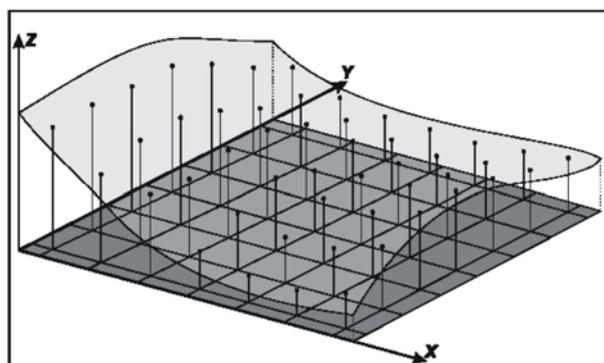


FIGURA 4.9 – Exemplo de grade regular.
 FONTE: Câmara e Monteiro (2001).

Desta forma, para a obtenção dos mapas hipsométrico, de declividade e de orientação das encostas foi gerado um MNT dos dados altimétricos (cotas altimétricas e isolinhas com equidistâncias de 20 m) extraídos das cartas topográficas. Optou-se pela utilização da grade regular, visto que as amostras da superfície não apresentavam espaçamentos regulares. Em virtude da escala de trabalho (1:100.000) e das curvas de níveis (20 m), determinou-se uma resolução da grade em x e y de 10 m. O interpolador utilizado foi a Média Ponderada por Cota e por Quadrante. Posteriormente, foi realizado um refinamento utilizando o interpolador Bilinear com as mesmas resoluções x e y utilizadas para a grade regular.

4.2.7.3 Mapa Hipsométrico

As classes hipsométricas foram definidas com base nos trabalhos de Florenzano (1993), Dias (2000) e Sestini (2000). A partir da cota 100 foram estabelecidas as demais classes com equidistâncias de 100 m, com o intuito de correlacioná-las com as cicatrizes de escorregamentos e comparar as classes entre si. Entretanto, abaixo desta cota foram criadas três novas classes: 0-20, 20-50 e 50-100 m. A primeira classe (0-20 m) foi criada com o intuito de separar a planície litorânea das áreas declivosas. Na segunda classe (20-50 m) buscou-se separar, principalmente, as áreas de deposição coluvionar, marcadas pelo acúmulo de detritos no sopé das encostas, transportados pela ação da gravidade. E a terceira classe (50-100 m) corresponde à transição entre as áreas de depósitos coluvionais e as de depósitos eluvionais (detritos provenientes da rocha matriz *in situ*), também chamada de baixa encosta.

4.2.7.4 Mapa de Declividade

Inicialmente, antes de ser realizado o mapa de declividade, foram definidas as classes de declive com base na legislação que rege as formas de uso e ocupação territorial e nas características do relevo. Além disso, para o fatiamento das classes, também foram levados em consideração os trabalhos de De Biasi (1992), Augusto Filho (1994), Francisco (1996), Dias (2000) e Fernandes et al. (2001).

De posse destas informações, foi possível definir os limites e as características mais relevantes de cada classe, conforme mostrado na Tabela 4.11. A partir do MNT foi gerado o mapa de declividade em porcentagem e realizado o fatiamento do mesmo.

TABELA 4.11 – Classes de declividade.

Classes (%)	Características
0 – 5 (2,9°)	Áreas favoráveis à ocupação e usos diversos, exceto aquelas definidas como áreas de preservação e com risco de inundação.
5 – 12 (6,8°)	Áreas que apresentam pouca restrição de uso e ocupação, exigindo-se práticas simples de conservação do solo. O limite máximo desta faixa coincide com o limite do emprego da agricultura mecanizada.
12 – 30 (16,7°)	Áreas que devem ser evitadas para fins de ocupação, pois torna-se necessário a adoção de medidas preventivas de riscos geoambientais. A partir desta faixa é necessário realizar cortes e aterros para instalação de edificações. Necessita de medidas complexas de conservação do solo.
30 – 47 (25,2°)	Áreas inadequadas à instalação de edificações e uso agrícola, e limite máximo para corte florestal. Risco de escorregamentos por indução antrópica.
47 – 100 (45°)	Áreas inadequadas a qualquer forma de uso e ocupação do solo, geralmente definidas como áreas de preservação florestal. Risco de escorregamentos naturais.
> 100	Áreas de preservação permanente. Riscos de escorregamentos naturais.

4.2.7.5 Mapa de Orientação das Encostas

Para a elaboração deste mapa de orientação (exposição) em graus, optou-se por dividir 360° por 8, que corresponde aos pontos cardeais e colaterais. Assim, o fatiamento do MNT foi realizado utilizando as seguintes classes: N (337,5-22,5), NE (22,5-67,5), E (67,5-112,5), SE (112,5-157,5), S (157,5-202,5), SW (202,5-247,5), W (247,5-292,5) e NW (292,5-337,5).

4.2.7.6 Mapas de Distâncias (*Buffers*)

Um mapa de distâncias consiste na criação de zonas (*buffers*) com larguras específicas (distâncias) em torno de um ou mais elementos do mapa (ponto, linha e área). As zonas são novos polígonos que servem para determinar a relação de proximidade com um fenômeno em uma área pré-definida (Burrough e McDonnell, 1998).

Diversos autores têm utilizado mapas de distâncias na análise de áreas susceptíveis a escorregamentos, relacionando a proximidade das cicatrizes de escorregamentos com outros parâmetros geofísicos. Dentre estes destaca-se a rede de drenagem (Temesgen et al., 2001; Dai e Lee, 2002; Donati e Turrini, 2002), estruturas geológicas (Gökceoglu e Aksoy, 1996) e estradas (Chang e Slaymaker, 2002).

Neste trabalho, no ambiente SPRING, foram realizados os mapas de distâncias de rios, de estradas e de lineamentos². As classes definidas para todos os mapas foram: 0-100, 100-200, 200-300, 300-400, 400-500 e > 500 m.

4.2.8 Tabulação Cruzada

A operação é realizada automaticamente no SPRING entre PIs no formato matricial. Entretanto, os dados devem apresentar a mesma resolução espacial e escala, o mesmo número de linhas e colunas (pixels) e as mesmas coordenadas no terreno.

² Lineamentos: feições de grande escala que são perceptíveis no relevo, resultantes da geologia estrutural (Guerra e Guerra, 2001).

A tabulação cruzada foi realizada com o intuito de correlacionar a ocorrência de escorregamentos e os parâmetros geoambientais na área de estudo; realizar a ponderação das classes e PIs de cada parâmetro; e avaliar a precisão dos mapas de susceptibilidades gerados neste trabalho.

Tabulados os dados e obtida a correlação, foi realizada a ponderação das classes das evidências, em linguagem de programação LEGAL (Apêndice A), com base na frequência de escorregamentos. Como resultado, cada plano de informação, no formato matricial, foi ponderado e transformado em formato numérico (MNT).

4.2.9 Elaboração dos Mapas de Susceptibilidade a Escorregamentos

4.2.9.1 Método Booleano

Neste método, conforme descrito no item 2.6.2.1, a combinação lógica dos planos de informação utiliza ponderadores booleanos, como por exemplo, o operador de intersecção “E”.

Inicialmente, todas as classes de cada evidência (PI) são reagrupadas para apenas duas classes: Favorável e Não-favorável. Apesar de ser realizada no SPRING entre PIs no formato matricial, em virtude de um problema inerente ao software, só foi possível realizar o cruzamento das informações no formato numérico.

Assim, as classes favoráveis receberam peso 1 e as classes não favoráveis receberam peso 0. Este ajustamento foi realizado em função da quantidade de escorregamentos por classe. Em seguida, foram somados os PIs e dividido pelo número total dos mesmos. Todo o processo foi realizado em programa LEGAL (Apêndice A).

Ao final, o MNT apresentou valores entre 0 e 1, onde os valores entre 0 e 0,5 foram associados à classe Não-favorável e os valores entre 0,51 e 1 associados à classe Favorável. Posteriormente, foi gerado o mapa de susceptibilidade booleano no formato matricial e realizada a avaliação utilizando o método da tabulação cruzada.

4.2.9.2 Método Média Ponderada

Neste processo cada evidência foi ponderada de acordo com a sua importância relativa. Os pesos das evidências foram definidos de modo heurístico com base na metodologia apresentada por Dias (2000) e Cristo (2002). Nestes trabalhos a combinação dos elementos da paisagem, principalmente dos condicionantes a ocorrência de escorregamentos, e a atribuição de pesos aos mesmos, envolveu uma discussão teórica aprofundada sobre os critérios e decisões a serem adotados. No trabalho de Cristo (2002) foram atribuídos valores de 0 a 10 para as evidências e suas respectivas classes, a fim de determinar quais mapas teriam maior peso no momento das combinações para obtenção dos diversos graus de susceptibilidade. Assim, com base nestes trabalhos e analisando a relação entre a frequência de escorregamentos e o tamanho de cada classe foram atribuídos os devidos pesos aos parâmetros geoambientais (Tabela 4.12). Posteriormente, os dados foram integrados através de uma média ponderada, implementada em um programa LEGAL (Apêndice A).

TABELA 4.12 – Ponderação das evidências – Média Ponderada.

Plano de informação	Peso
Mapa hipsométrico	4
Mapa de declividade	9
Mapa de orientação de encostas	5
Mapa de distâncias de rios	7
Mapa de distâncias de estradas	8
Mapa de distâncias de lineamentos	7
Mapa geológico	8
Mapa pedológico	3
Mapa de uso e cobertura da terra	6

O MNT final foi fatiado utilizando o método Desvio Quartílico. Este método, conforme Ramos e Sanchez (2000), divide a série de dados em quatro grupos com igual número

de ocorrências, cada um compreendendo 25% do total de valores. Os autores destacam como vantagem o cálculo simples e rápido, principalmente quando tem-se grande volume de dados. Além disso, o fatiamento é definido quantitativamente, excluindo a subjetividade no processo de definição do limiar de corte. No entanto, sua maior desvantagem reside no fato de não considerar a amplitude dos dados, mas somente a sua posição na série.

Assim, tendo como base o Desvio Quartílico, foram então definidas quatro classes de susceptibilidade a escorregamentos para o fatiamento do MNT: Muito Alta, Alta, Média e Baixa/Nula. Após, o mapa de susceptibilidade foi gerado no formato matricial e realizada a avaliação utilizando o método da tabulação cruzada.

4.2.9.3 Método AHP

A primeira etapa a ser realizada no método AHP é a definição empírica dos pesos de cada evidência através de uma análise pareada. Esse método objetiva capturar o conhecimento de um especialista indicando o grau de importância relativa entre as evidências.

No SPRING o módulo de análise espacial calcula automaticamente os autovetores da matriz de pesos, os quais correspondem aos ponderadores das evidências, e a razão de consistência que é um parâmetro que indica a coerência nas relações. Entretanto, o SPRING apresenta uma limitação quanto à quantidade de evidências a serem combinadas, ou seja, limita-se a combinar cinco evidências de cada vez. Desta forma, foram selecionadas, num primeiro momento, cinco evidências: Declividade, Distâncias de estradas, Hipsométrico, Distâncias de lineamentos e Geologia. Depois selecionaram-se as quatro evidências restantes: Orientação de encostas, Pedologia, Distâncias de rios e Uso e cobertura da terra. Para o primeiro grupo a razão de consistência foi de 0,028, e para o segundo foi de 0,019. Ressalta-se que a ponderação das classes foi definida com base na quantidade de escorregamentos por classe, conforme descrito no item 4.2.8.

Assim, no programa LEGAL, foi realizada a soma ponderada das evidências (Apêndice A), que resultou em um MNT final. Este PI foi fatiado pelo método Desvio Quartílico e

adotaram-se as mesmas classes definidas para o mapa de susceptibilidade gerado pela média ponderada. O processo de avaliação foi similar ao realizado para a técnica de inferência Média Ponderada.

Neste trabalho, as relações consideradas tiveram como base os pesos definidos na Tabela 4.12 do item 4.2.9.2, isto é, as mesmas utilizadas para o método da média ponderada. As combinações consideradas são apresentadas na Tabela 4.13.

TABELA 4.13 – Ponderação das evidências - AHP.

	Dec	Est	Geo	Lin	Rio	Uso	Ori	Hip	Ped	Pesos
Dec	1									0,398
Est	1/2	1								0,197
Geo	1/2	1	1							0,183
Lin	1/3	1/2	1/2	1						0,142
Rio	1/3	1/2	1/2	1	1					0,473
Uso	1/4	1/3	1/3	1/2	1/2	1				0,284
Ori	1/5	1/4	1/4	1/3	1/3	1/2	1			0,170
Hip	1/6	1/5	1/5	1/4	1/4	1/3	1/2	1		0,043
Ped	1/7	1/6	1/6	1/5	1/5	1/4	1/3	1/2	1	0,073

Dec (Declividade); Est (Distâncias de Estradas); Geo (Geologia); Lin (Distâncias de Lineamentos); Rio (Distâncias de Rios); Uso (Uso e Cobertura da Terra); Ori (Orientação de Encostas); Hip (Hipsométrico); Ped (pedológico).

4.2.9.4 Método Probabilidade Condicional

A ponderação das classes por Probabilidade Condicional foi realizada através do cálculo do Contraste (C_w). Este parâmetro estatístico visa maximizar a correlação existente entre as evidências e as ocorrências de escorregamentos.

Inicialmente, é realizada uma tabulação cruzada entre o PI das ocorrências de escorregamentos e o PI de uma evidência. A tabulação cruzada fornece uma matriz de

confusão onde cada célula da matriz indica a intersecção (sobreposição) das classes dos PIs. Desta forma, para cada classe de cada evidência, foi gerada uma matriz, de modo que o cálculo do contraste fosse efetuado sempre em um padrão binário, isto é, ocorrência (favorável) e ausência de ocorrência de escorregamentos (não-favorável).

A Tabela 4.14 apresenta um exemplo de matriz de confusão realizada para a classe Granitóides da evidência Geologia. Nota-se que na classe Granitóides ocorreram 346 escorregamentos dos 397 ocorridos. Esta classe corresponde a 47% (2.306.731 pixels) da área do total da evidência. Assim, a matriz de confusão, em padrão binário, fornece os dados suficientes para o devido cálculo da razão de suficiência (LS) e da razão de necessidade (LN). Este cálculo foi realizado utilizando as equações 2.10 e 2.11 do item 2.6.2.1. No cálculo do Contraste foi utilizada a equação 2.9 do mesmo item. Para este exemplo, o resultado do LS , LN e C_w foi de 7,03; 0,15; e 3,87.

TABELA 4.14 – Exemplo de matriz de confusão utilizada para o cálculo do C_w .

	Não-ocorrências	Ocorrências	Total
Granitóides	2.306.385	346	2.306.731
Não-granitóides	16.308.218	51	16.308.269
Total	18.614.603	397	18.615.000

Para a elaboração do mapa de susceptibilidade a escorregamentos, após o cálculo do C_w para cada classe de cada evidência, foram gerados novos planos de informação no formato numérico. Esta reclassificação das classes foi realizada utilizando um programa em LEGAL (Apêndice A).

A ponderação dos planos de informação também foi realizada de maneira semelhante, isto é, através do cálculo do C_w . Neste caso, as classes foram reagrupadas em favoráveis e não-favoráveis, ou seja, todas as classes que apresentaram valores positivos (> 0) de C_w foram computadas como favoráveis à ocorrência de escorregamentos, e as que apresentaram valores negativos (< 0) foram computadas como não-favoráveis. Na Tabela 4.14, estas classes ocupariam as células *Granitóides* e *Não-granitóides*.

Desta forma, a seleção das classes baseou-se em critérios estatísticos ao invés de heurísticos. Com base nestes critérios, foram estipulados os pesos para cada evidência utilizada neste trabalho. Na Tabela 4.15 os pesos estão representados pelo valor do C_w .

TABELA 4.15 – Ponderação das evidências – Probabilidade Condicional.

Plano de informação	<i>LS</i>	<i>LN</i>	C_w
Mapa hipsométrico	6,80	0,07	4,62
Mapa de declividade	5,28	0,13	3,72
Mapa de orientação de encostas	2,88	0,01	5,52
Mapa de distâncias de rios	3,49	0,03	4,71
Mapa de distâncias de estradas	2,97	0,79	1,33
Mapa de distâncias de lineamentos	5,60	0,36	2,75
Mapa geológico	4,97	0,02	5,42
Mapa pedológico	7,55	0,03	5,47
Mapa de uso e cobertura da terra	4,37	0,04	4,72

No programa LEGAL foi realizada a soma ponderada das evidências (Apêndice A), que resultou em um MNT final. Este PI foi fatiado pelo método Desvio Quartílico e também adotaram-se as mesmas classes e método de avaliação utilizada para a Média Ponderada.

CAPÍTULO 5

RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Avaliação Cartográfica

Alguns pontos de teste apresentaram erros de posicionamento elevados em relação às coordenadas reais medidas em campo com GPS. Estes erros impossibilitaram a realização de mapeamentos Classe A na escala da base de referência (1:50.000). Na Tabela 5.1 verifica-se, que dos 14 pontos avaliados, somente 4 apresentaram erros de posicionamento inferiores aos 25 m de tolerância máxima em relação à escala da carta topográfica. Os valores de RMSE em X e Y foram de 23,53 e de 36,14 m, respectivamente, enquanto que para o RMSE Total o valor obtido foi de 43,12 m.

Conforme o Decreto-Lei nº 89.817 de 20 de Junho de 1984, Capítulo II, Seção 1, Artigo 8, que estabelece o PEC (Padrão de Exatidão Cartográfico), um mapeamento só poderá ser considerado classe A, B e C, quando a exatidão planimétrica for, respectivamente, igual ou menor que 0,5, 0,8 e 1 mm da escala do mapa (Brasil, 1986). Na escala 1:50.000, conseqüentemente, os mapas classe A possuirão uma tolerância máxima de erro de 25 metros.

Assim, obedecendo aos critérios do PEC, a escala ideal de mapeamento Classe A sugerida foi de 1:100.000. Apesar de 4 pontos ainda apresentarem valores acima do erro de posicionamento máximo permitido (ϵ) (Tabela 5.1), não comprometeram a realização de produtos cartográficos para esta escala de trabalho.

O valor médio de EPE para os 14 pontos foi de aproximadamente 3,57 m. Isto significa que, mesmo que este erro seja somado ao RMSE, não compromete a viabilidade cartográfica para a escala 1:100.000.

TABELA 5.1 – Resultado da avaliação cartográfica.

Pontos	ΔX (m)	ΔY (m)	EP (m)	EP $> \epsilon$
1	-57,33	-8,15	57,91	57,91
2	7,23	-1,50	7,38	-----
3	-15,31	-20,03	25,21	-----
4	11,97	23,09	26,01	-----
5	-15,44	11,42	19,20	-----
6	4,04	16,35	16,84	-----
7	32,39	14,94	35,67	-----
8	-2,55	1,67	3,04	-----
9	17,51	33,22	37,55	-----
10	-34,79	72,02	79,98	79,98
11	-15,64	67,42	69,21	69,21
12	-13,33	57,64	59,16	59,16
13	-8,46	46,95	47,71	-----
14	-26,76	17,06	31,74	-----

RMSE X (m): 23,53

RMSE Y (m): 36,14

RMSE (m): 43,12

Para entender o comportamento dos erros de posicionamento, foram associados em meio digital os PIs contendo a imagem PAN SPOT, os pontos de teste e os arruamentos retirados das cartas topográficas. Este procedimento foi adotado, uma vez que todos os planos de informações foram georreferenciados a partir destas bases (Figura 5.1).

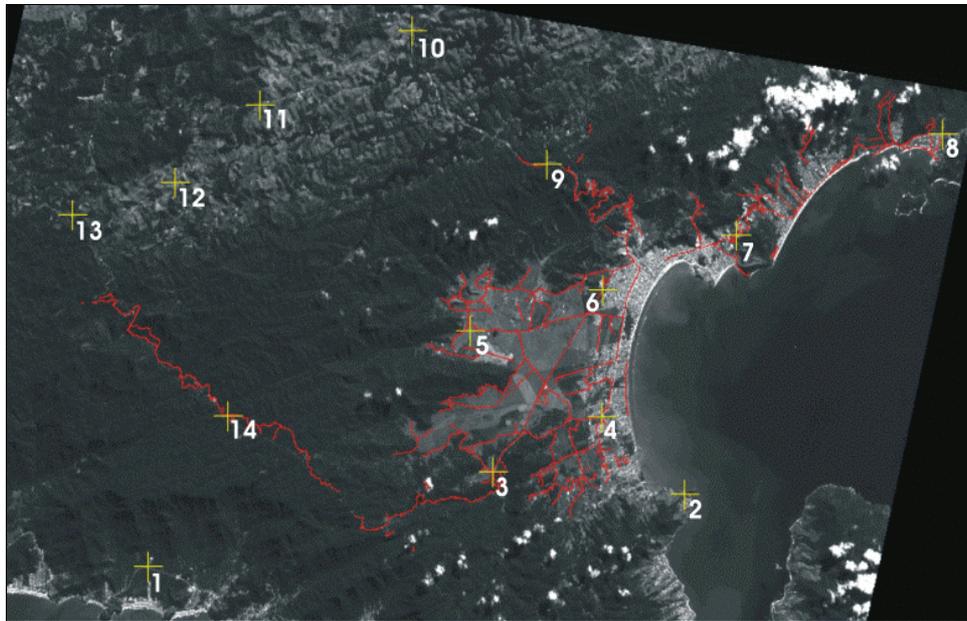


FIGURA 5.1 – Distribuição dos pontos de teste e arruamentos extraídos da base cartográfica.

Ao analisar a Figura 5.1, nota-se que as áreas mais propícias para a seleção de pontos de controle estão situadas na planície litorânea onde está instalada a área urbana. Desta forma, constatou-se que a partir do cruzamentos do PI da imagem com o do arruamento, foram identificadas as prováveis feições homólogas utilizadas no registro das cartas topográficas e das imagens do banco de dados de Caraguatatuba.

A maioria dos pontos de teste que apresentaram elevados erros de posicionamento esta localizada na área do planalto, com exceção do ponto 1, localizado na planície litorânea (Figuras 5.1 e 5.2). Entretanto, como os demais, este ponto está a dezenas de quilômetros do sítio urbano municipal.

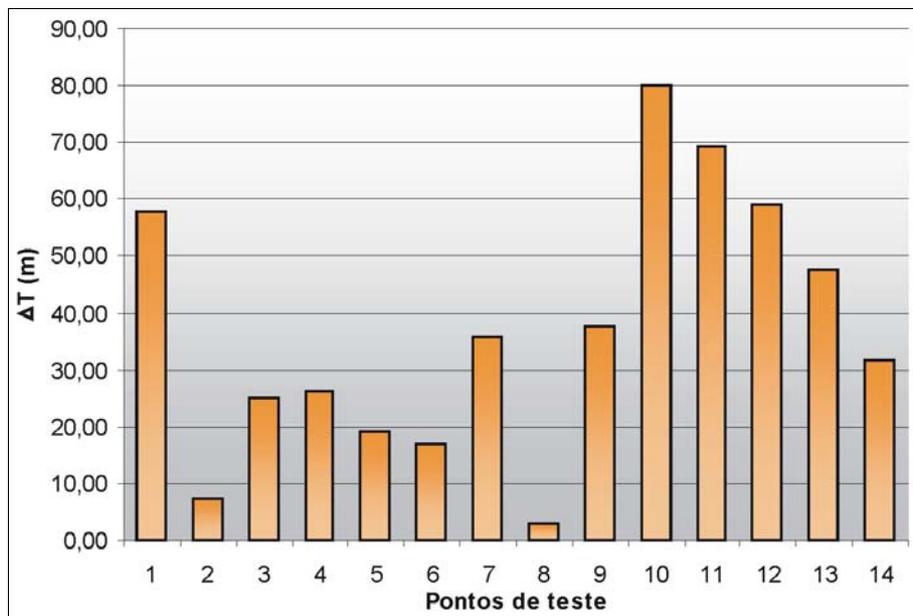


FIGURA 5.2 - Erro de posicionamento para cada ponto de teste.

Assim, pela impossibilidade de obtenção de uma boa distribuição de pontos de controle em virtude da ausência de feições homólogas, as imagens e a carta topográfica devem ter sido, possivelmente, registradas somente com os pontos coletados nas áreas urbanizadas da planície. Nestas áreas houve uma boa amarração geométrica, diminuindo os erros de posicionamento; em contrapartida, no planalto e em outras áreas da planície, a ausência de pontos de controle e conseqüente falta de amarração geométrica ocasionou os maiores deslocamentos planimétricos.

Para esta análise em particular, verificou-se que o principal fator que influenciou no comportamento dos erros foi à má distribuição dos pontos de controle utilizados para georreferenciar a carta topográfica e a imagem PAN SPOT. Este pressuposto vem ao encontro das observações realizadas por Silva (1988), ou seja, a excessiva concentração de pontos em uma determinada área e a ausência em outras são uma das principais fontes de distorções geométricas quando aplicado o modelo de correção polinomial.

A definição da escala de trabalho em 1:100.000, além de respeitar as normas cartográficas brasileiras, é a mais apropriada para mapeamentos utilizando imagens Landsat (D'Alge, 1997). Conforme Welch et al. (1985) e Vergara et al. (1997), os erros

internos típicos de imagens TM aproximam-se muito de 50 m, que representa os 0,5 mm de erro máximo para esta escala. Além disso, a escala utilizada para a extração de informações deve ser sempre maior que aquela em que se pretende gerar o produto final. Com isto, preserva-se não só a qualidade geométrica como também a do conteúdo informativo do produto a ser gerado.

5.2 Métodos de Fusão para a Identificação de Escorregamentos

Foram avaliados seis métodos de fusão de imagens (Brovey, HSV, PCA, IHS, WTVE e WTYO) com o objetivo de identificar o mais adequado para a identificação das cicatrizes de escorregamentos. As avaliações concentraram-se na verificação da qualidade espacial e espectral das fusões realizadas entre as imagens PAN HRV e 453 ETM (HRV/ETM) (Apêndice B) e entre as imagens PAN ETM e 453 ETM (ETM/ETM) (Apêndice C). Outro fator analisado foi o potencial fotointerpretativo, onde diversos especialistas em sensoriamento remoto deram notas referentes à qualidade visual das imagens obtidas pela fusão HRV/ETM. Ressalta-se que estas avaliações foram realizadas para as fusões das imagens da área teste, conforme estabelecido nos procedimentos metodológicos da pesquisa.

5.2.1 Avaliação Espacial dos Métodos de Fusão

5.2.1.1 HRV/ETM

Na Tabela 5.2 é possível notar que todos os seis métodos de fusão avaliados apresentaram bons resultados, com correlação de detalhes acima de 80%. No entanto, o WTVE destacou-se dos demais, principalmente nas bandas 3 e 5, perdendo somente para o método Brovey na banda 4.

TABELA 5.2 – Resultado da correlação de detalhes – HRV/ETM.

Método	Correlação	Método	Correlação	Método	Correlação
Brovey 3	0,91	Brovey 4	0,88	Brovey 5	0,96
HSV 3	0,82	HSV 4	0,79	HSV 5	0,85
PCA 3	0,86	PCA 4	0,82	PCA 5	0,84
IHS 3	0,86	IHS 4	0,82	IHS 5	0,88
WTVE 3	0,97	WTVE 4	0,85	WTVE 5	0,97
WTYO 3	0,87	WTYO 4	0,81	WTYO 5	0,86

Todos os métodos apresentaram uma queda acentuada na banda 4, principalmente o WTVE (Figura 5.3). Nenhum dos métodos avaliados chegou a alcançar uma correlação superior a 90% para esta banda. Este resultado pode ser explicado pela baixa variância da banda 4 em relação às demais bandas, ou seja, a baixa variância indica menor quantidade de detalhes na imagem. Conseqüentemente, ocorre uma diminuição no número de transições abruptas na imagem passíveis de serem identificadas pelo filtro Laplaciano.

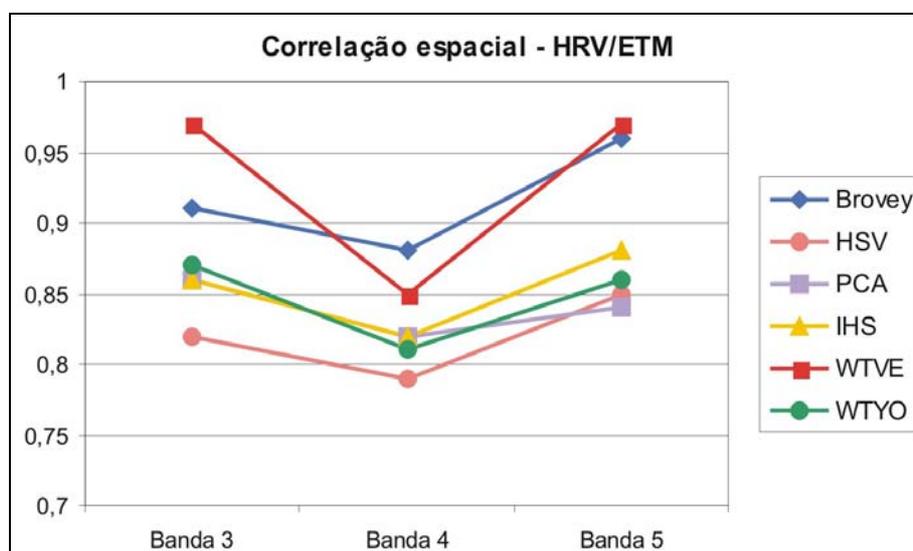


FIGURA 5.3 – Avaliação espacial da fusão HRV/ETM.

Outro fato que chamou a atenção foi a influência dos erros de registro no processo de fusão. Na Figura 5.4 verifica-se que a inadequada distribuição dos pontos de controle

usados na fase de correção geométrica das imagens foi o principal fator que afetou a qualidade das imagens fundidas. Na área urbanizada, onde os erros de registros foram relativamente baixos, não houve interferência significativa no resultado da fusão, ao contrário das áreas mais afastadas da mesma. Nota-se que o erro de registro ocasionou um deslocamento significativo das feições lineares (estradas) para estas áreas, quase que duplicando-as. Este efeito foi identificado em todas as bandas híbridas dos métodos de fusão analisados.

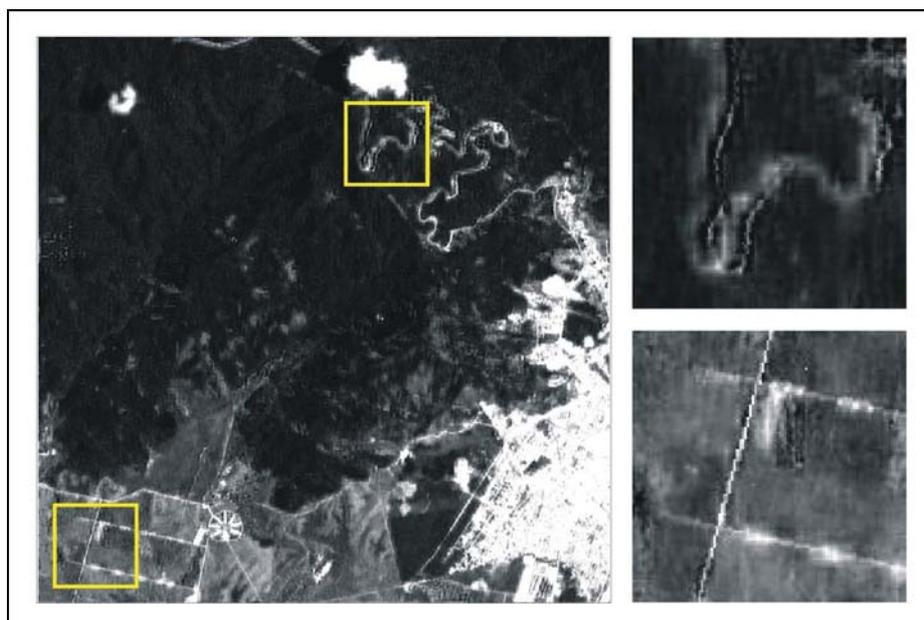


FIGURA 5.4 – Influência dos erros de registro no processo de fusão.

5.2.1.2 ETM/ETM

A fusão WTVE, conforme Tabela 5.3, apresentou uma correlação que ultrapassou os 90%, sobressaindo-se dos outros cinco métodos de fusão em todas as bandas avaliadas. A banda 4 também apresentou um comportamento semelhante ao verificado no caso anterior (HRV/ETM), com exceção dos métodos Brovey e HSV.

TABELA 5.3 – Resultado da correlação de detalhes – ETM/ETM.

Método	Correlação	Método	Correlação	Método	Correlação
PAN ETM	1,00	PAN ETM	1,00	PAN ETM	1,00
Brovey 3	0,45	Brovey 4	0,69	Brovey 5	0,71
HSV 3	0,76	HSV 4	0,87	HSV 5	0,88
PCA 3	0,83	PCA 4	0,75	PCA 5	0,80
IHS 3	0,86	IHS 4	0,76	IHS 5	0,84
WTVE 3	0,94	WTVE 4	0,92	WTVE 5	0,96
WTYO 3	0,85	WTYO 4	0,75	WTYO 5	0,81

Destacam-se também nesta avaliação (Figura 5.5) os baixos valores de correlação obtidos para as bandas híbridas do método Brovey. Além disso, nota-se na Figura 5.6 um comportamento semelhante para os métodos PCA, IHS e WTYO, isto é, os valores obtidos na correlação de detalhes foram praticamente os mesmos em todas as bandas avaliadas para estes métodos de fusão.

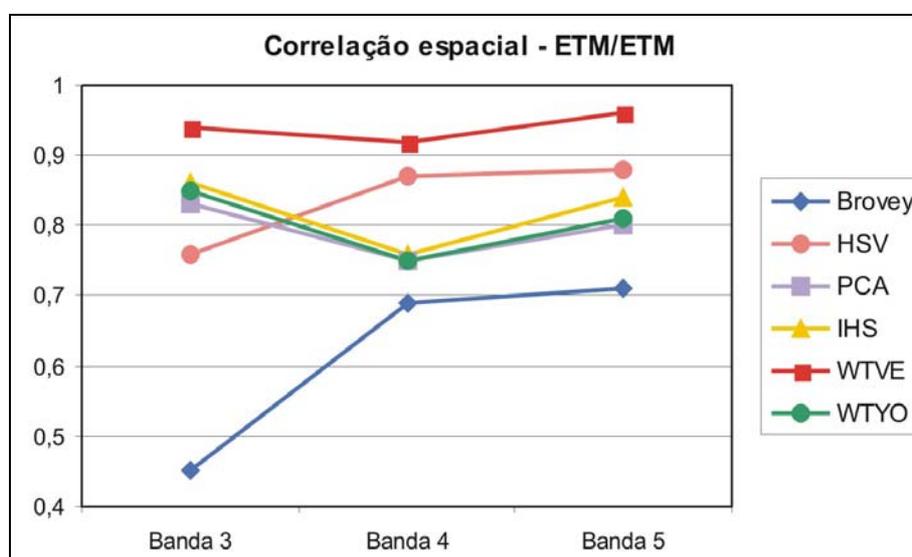


FIGURA 5.5 – Avaliação espacial da fusão ETM/ETM.

5.2.1.3 Síntese da Avaliação Espacial

Através da avaliação da correlação espacial, conclui-se que o método WTVE apresentou os melhores resultados, comprovados pelos altos índices de correlação obtidos para ambos os casos. Com exceção da banda 4 no caso HRV/ETM, todas as demais bandas avaliadas apresentaram correlações acima de 90%. Os métodos PCA, IHS e WTYO, apesar de apresentarem bons índices de correlação, destacaram-se pelos resultados similares entre si na maioria das bandas avaliadas.

Acredita-se que os erros de registro interferiram no resultado de alguns métodos de fusão para o caso HRV/ETM. Esta influência, como verificado na Figura 5.6, não foi verificado para o caso ETM/ETM, por utilizar imagens obtidas em uma mesma condição atmosférica e por um mesmo sensor.

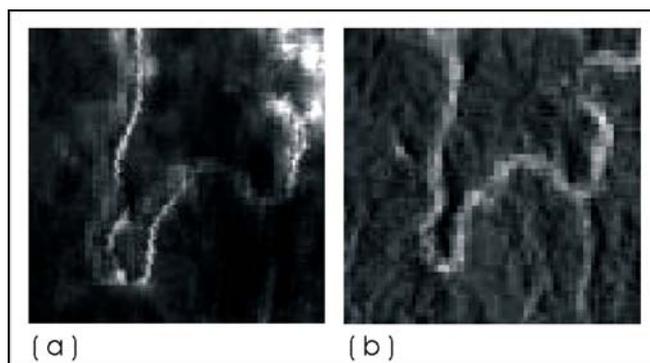


FIGURA 5.6 – Comparação dos erros de registro obtidos com as fusões de imagens HRV/ETM (a) e ETM/ETM (b).

Para a fusão ETM/ETM houve uma predominância do método WTVE em todas as bandas avaliadas. Apesar do método WTYO também utilizar Transformada Wavelet, não apresentou bons resultados, sendo superado pelos métodos HSV e IHS.

5.2.2 Avaliação Espectral dos Métodos de Fusão

5.2.2.1 HRV/ETM

Com base nas análises comparativas entre as estatísticas das imagens híbridas e originais, buscou-se verificar os métodos de fusão de imagens que melhor preservam as características espectrais das bandas multiespectrais ETM.

Na Tabela 5.4, é possível verificar que, apesar dos bons resultados obtidos pelos métodos de fusão que utilizam a Transformada Wavelet, houve uma sensível predominância do método IHS sobre todos os demais. Praticamente em todas as bandas avaliadas este método apresentou valores muito similares aos verificados para as bandas originais. A única exceção foi na banda 4, onde a variância do WTVE foi mais próxima da original, mostrando-se também muito apropriado para fusões com imagens dos sensores HRV e ETM. Conseqüentemente, observou-se que os melhores valores de D_{ho} para a média e desvio padrão foram obtidos pelos métodos IHS, WTVE e WTYO, com destaque para o método IHS (Figura 5.7).

TABELA 5.4 – Resultado da avaliação espectral – HRV/ETM

	Média	Var	DP	CV
Banda 3	48,20	517,11	22,74	0,47
Brovey	15,04	147,14	12,13	0,81
HSV	32,54	1949,22	44,15	1,36
PCA	126,73	855,56	29,25	0,23
IHS	47,59	518,02	22,76	0,48
WTVE	44,01	506,70	22,51	0,51
WTYO	43,80	812,25	28,50	0,65
	Média	Var	DP	CV
Banda 4	92,73	233,17	15,27	0,16
Brovey	27,17	85,01	9,22	0,34
HSV	50,29	1900,09	43,59	0,87
PCA	126,92	254,08	15,94	0,13
IHS	91,27	225,30	15,01	0,16
WTVE	88,95	237,78	15,42	0,17
WTYO	88,59	306,25	17,50	0,20
	Média	Var	DP	CV
Banda 5	88,16	675,48	25,99	0,29
Brovey	27,02	240,25	15,50	0,57
HSV	55,19	3746,66	61,21	1,11
PCA	126,77	1131,65	33,64	0,27
IHS	86,16	672,36	25,93	0,30
WTVE	83,73	639,08	25,28	0,30
WTYO	83,82	1048,46	32,38	0,39

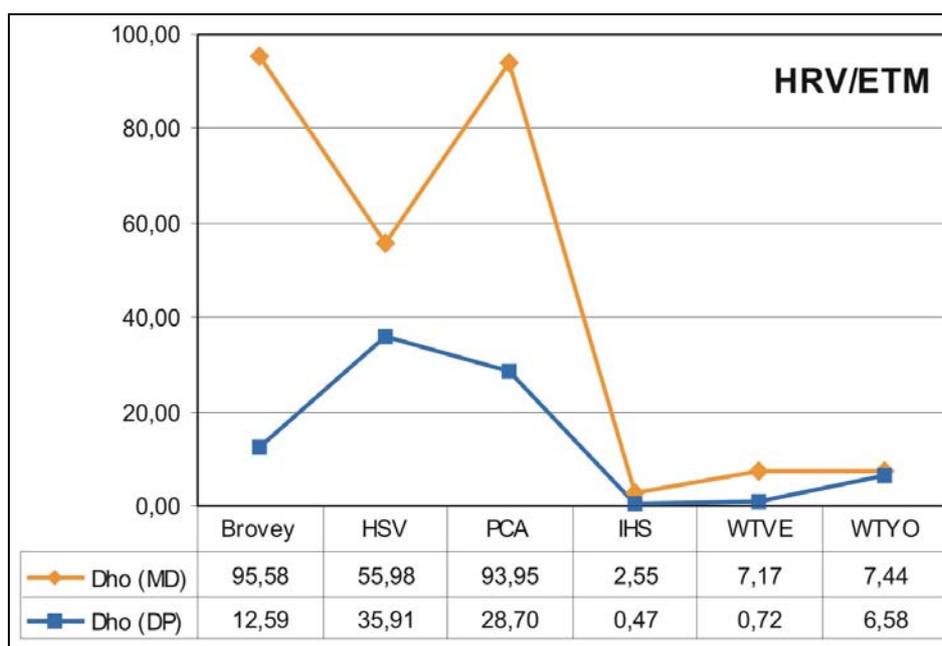


FIGURA 5.7 – Distância euclidiana da média e desvio padrão para a avaliação espectral dos diferentes métodos de fusão para o caso HRV/ETM.

Além disso, os valores de média e variância repercutiram no cálculo do CV, que demonstra o efeito da variação das observações em relação à média. Conforme Figura 5.8, a distância euclidiana do CV para os métodos IHS e WTVE foi praticamente nula, ou seja, apresentaram um D_{ho} de 0,01 e 0,04, respectivamente.

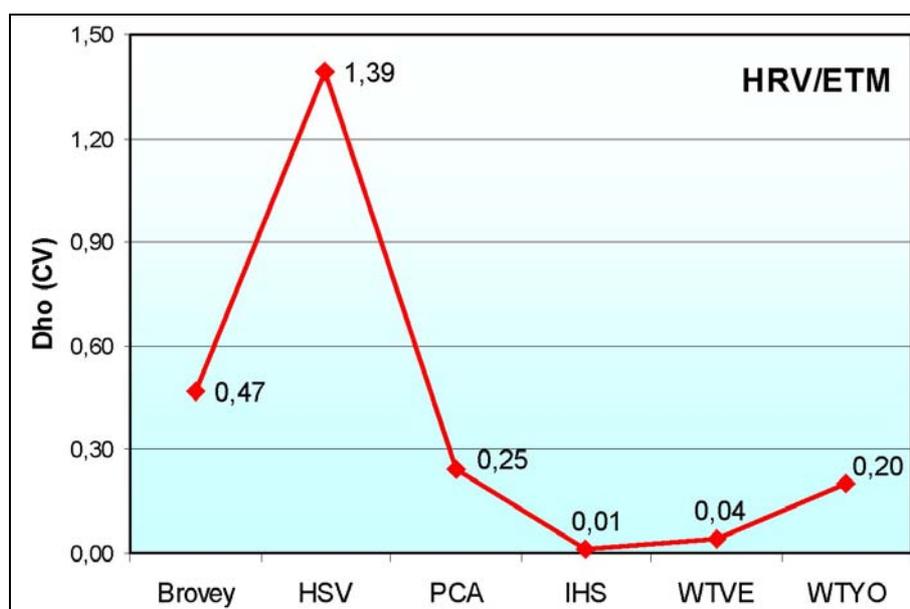


FIGURA 5.8 – Distância euclidiana do CV para a avaliação espectral dos diferentes métodos de fusão para o caso HRV/ETM.

5.2.2.2 ETM/ETM

Com relação aos métodos avaliados, destacaram-se o IHS, WTVE e WTYO. Para todas as bandas avaliadas, estes métodos revezaram-se entre os valores estatísticos de média, variância e CV mais similares as bandas originais (Tabela 5.5).

Na Figura 5.9, nota-se que os métodos de fusão com Transformada Wavelet obtiveram os melhores valores de D_{ho} tanto para a média quanto para o desvio padrão. Apesar de ter apresentado um resultado inferior ao WTYO na média, o WTVE destacou-se significativamente com relação ao desvio padrão.

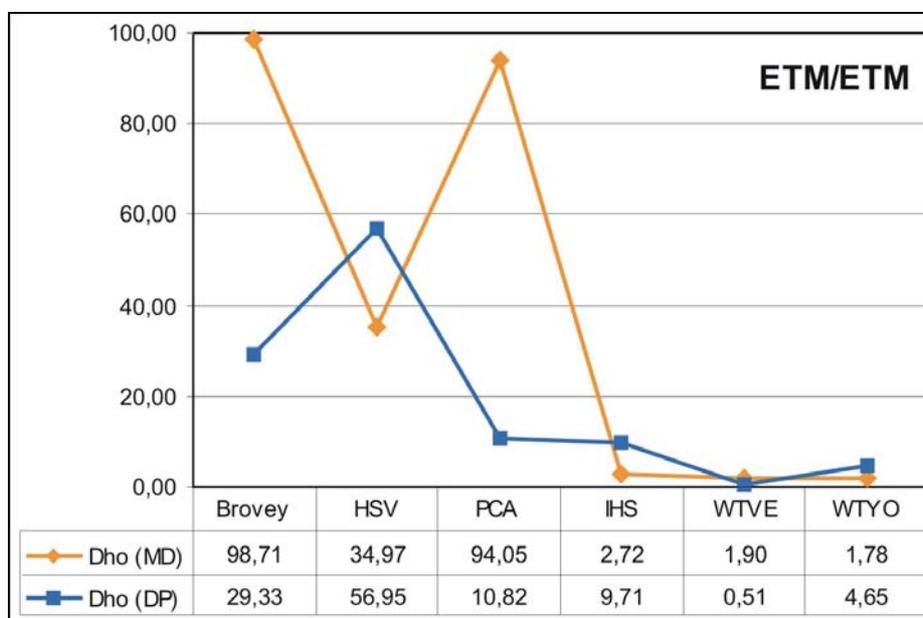


FIGURA 5.9 – Distância euclidiana da média e desvio padrão para a avaliação espectral dos diferentes métodos de fusão para o caso ETM/ETM.

TABELA 5.5 – Resultado da avaliação espectral – ETM/ETM

	Média	Var	DP	CV
Banda 3	48,20	517,11	22,74	0,47
Brovey	12,93	22,66	4,76	0,37
HSV	60,70	1767,36	42,04	0,69
PCA	126,73	855,56	29,25	0,23
IHS	46,56	383,77	19,59	0,42
WTVE	47,58	534,07	23,11	0,49
WTYO	47,59	639,58	25,29	0,53
	Média	Var	DP	CV
Banda 4	92,73	233,17	15,27	0,16
Brovey	26,21	25,50	5,05	0,19
HSV	115,70	3122,57	55,88	0,48
PCA	127,07	396,01	19,90	0,16
IHS	92,87	592,44	24,34	0,26
WTVE	91,53	223,20	14,94	0,16
WTYO	91,69	310,11	17,61	0,19
	Média	Var	DP	CV
Banda 5	88,16	675,48	25,99	0,29
Brovey	24,33	26,94	5,19	0,21
HSV	111,38	3714,90	60,95	0,55
PCA	126,89	1108,22	33,29	0,26
IHS	86,00	603,68	24,57	0,29
WTVE	86,83	681,73	26,11	0,30
WTYO	86,85	846,23	29,09	0,33

Em termos de variância e desvio padrão, o WTVE obteve os melhores índices para todas as bandas avaliadas. Conseqüentemente, isto veio a refletir em um D_{ho} muito baixo para o CV (Figura 5.10), demonstrando o quão similar espectralmente são as imagens híbridas das originais.

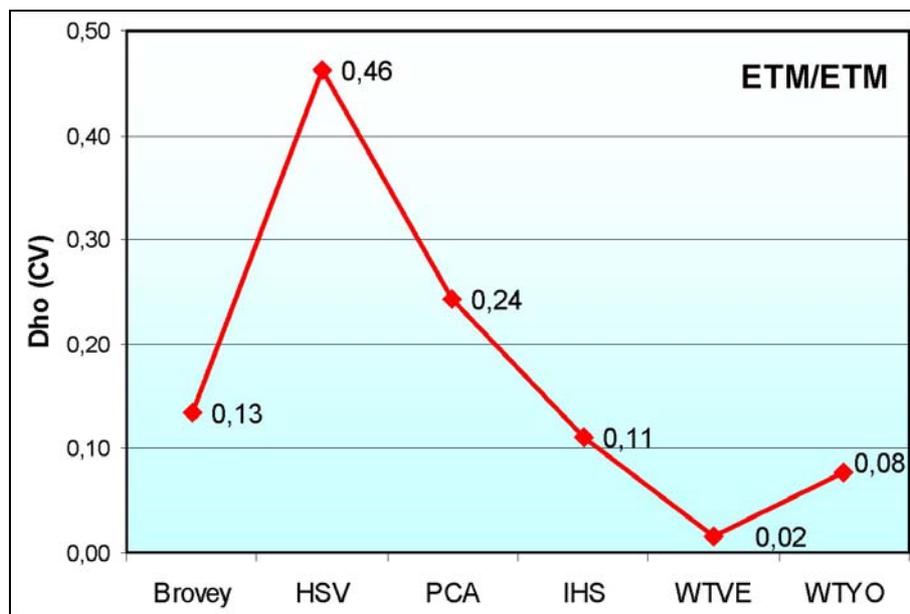


FIGURA 5.10 – Distância euclidiana do CV para a avaliação espectral dos diferentes métodos de fusão para o caso ETM/ETM.

5.2.2.3 Síntese da Avaliação Espectral

Para o caso HRV/ETM, apesar da boa qualidade espectral das imagens híbridas WT, os melhores resultados foram obtidos com as imagens IHS. Este método perdeu somente para o WTVE na variância e desvio padrão da banda 4. Assim, o método IHS mostrou ser o mais adequado espectralmente para a fusão entre as bandas PAN HRV e 453 ETM. Entretanto, acredita-se que tais resultados podem ter sido afetados pelos erros de registro.

No entanto, no caso ETM/ETM, as imagens híbridas obtidas pelos métodos WTVE e WTYO foram as que apresentaram os melhores resultados estatísticos para todas as bandas avaliadas. Apesar da pequena diferença no D_{ho} existente entre estes métodos, o WTVE prevaleceu sobre os demais, conseqüentemente, foi o método que forneceu imagens híbridas espectralmente mais similares às originais.

5.2.3 Avaliação Visual dos Métodos de Fusão

Na avaliação visual dos seis métodos de fusão, conforme Figura 5.11, nota-se que em relação a similaridades de detalhes espaciais, o método IHS apresentou os melhores resultados. Na avaliação espectral, destacaram-se significativamente os métodos de fusão WTVO e WTVE, respectivamente. Na avaliação do potencial fotointerpretativo, não houve um método que se destacou significativamente dos demais. Mesmo assim, houve uma leve predominância do WTVO em relação ao WTVE, ao PCA e ao IHS. Outro fato interessante, apesar desta pequena superioridade, foi o comportamento semelhante dos métodos de fusão Wavelet em todos as avaliações realizadas.

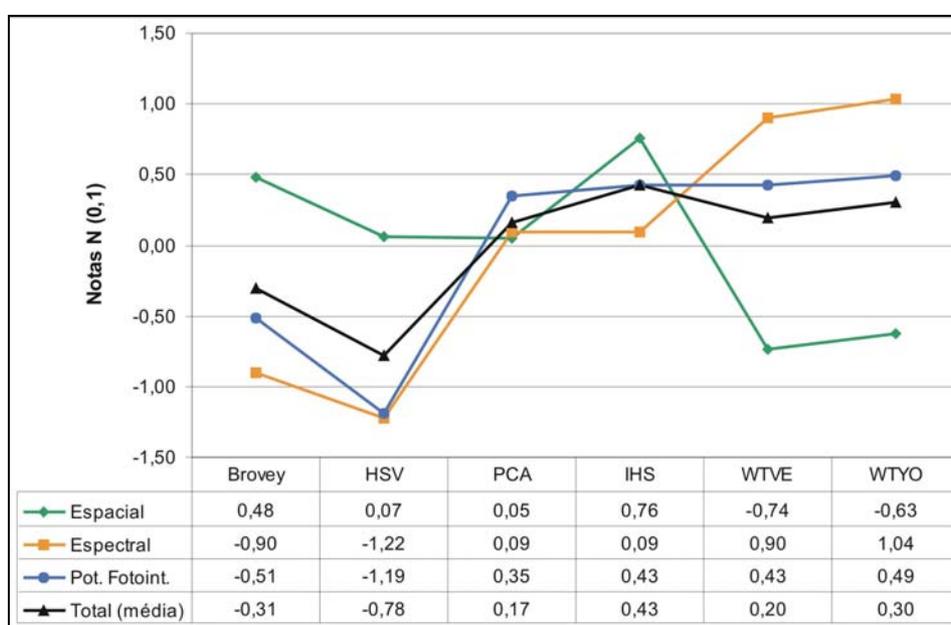


FIGURA 5.11 – Resultado da avaliação visual dos seis métodos de fusão - HRV/ETM.

Com base nestes requisitos avaliados, a média das notas apresentou uma superioridade do método IHS sobre os demais, ou seja, foi o que apresentou o melhor resultado em termos gerais. Para os especialistas, além de uma alta similaridade de detalhes e boa correlação espectral, este método também mostrou excelente aplicabilidade para a discriminação dos diversos alvos presentes na cena.

5.2.4 Síntese dos Processos de Avaliação dos Métodos de Fusão

Com o intuito de realizar uma síntese dos processos de avaliação, foi determinada a colocação de cada método em relação aos diversos testes realizados. Desta forma, foi possível determinar uma colocação média e selecionar o melhor método para a identificação de cicatrizes de escorregamentos e elaboração do mapa de inventário.

Na Figura 5.12, verifica-se que, tanto na avaliação quantitativa quanto na qualitativa para o caso HRV/ETM, os resultados apresentaram um comportamento similar. A curva da avaliação espacial foi a que se diferenciou relativamente das demais. Entretanto, o que mais chamou a atenção foi a correlação existente entre a avaliação espectral e a visual. Isto vem demonstrar que a metodologia proposta para o processo de avaliação visual de imagens ópticas orbitais é adequada e coerente com o método de avaliação estatística.

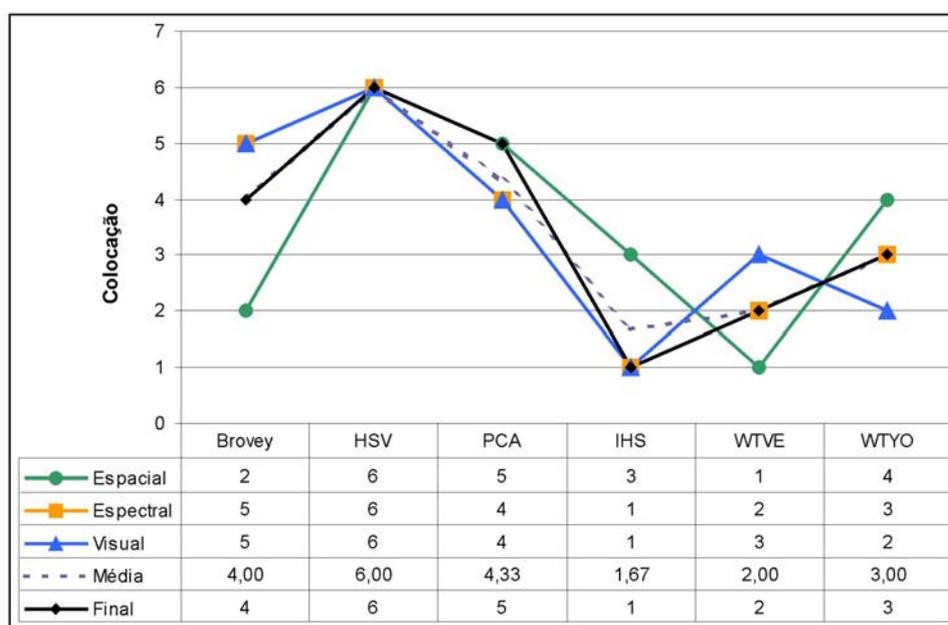


FIGURA 5.12 – Resultado final da avaliação dos métodos de fusão – HRV/ETM.

Acredita-se que, analisando a curva síntese (Figura 5.12), se o erro de registro não tivesse sido tão elevado, os resultados apresentados pelo método de avaliação visual poderiam ter sido ainda melhores.

Apesar dos métodos IHS e WTVE apresentarem resultados relativamente semelhantes, selecionou-se o primeiro como o melhor devido aos resultados obtidos na avaliação espectral e na visual. Conforme Figura 5.13, o método IHS destacou significativamente as cicatrizes de escorregamentos dos demais alvos presentes na imagem, tanto nas áreas de floresta (círculo maior) quanto nas áreas antropizadas (círculo menor). Até mesmo próximo às áreas urbanas, é possível discriminar visualmente as cicatrizes de alvos com respostas espectrais relativamente similares, como estradas, edificações, etc.

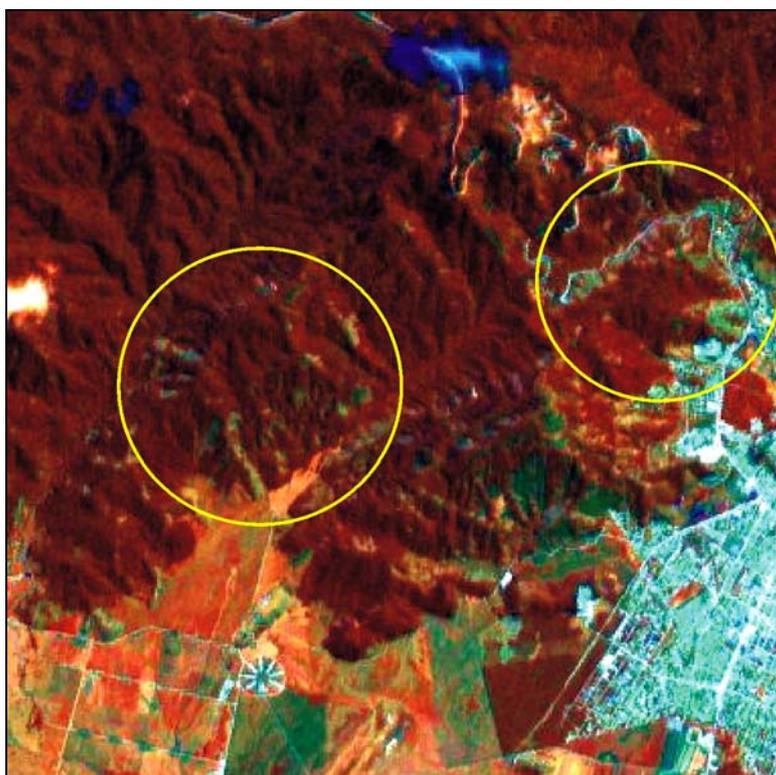


FIGURA 5.13 – Escorregamentos destacados pelo método IHS para o caso HRV/ETM.

Para o caso ETM/ETM, o método que apresentou os melhores resultados na avaliação quantitativa foi o WTVE conforme foi mostrado nos itens 5.2.1.2 e 5.2.2.2, ou seja, foi o que apresentou para todas as bandas alta similaridade espacial e espectral entre as imagens híbridas e as originais. Salienta-se que a fusão ETM/ETM foi avaliada com o objetivo de verificar se a qualidade espectral destas imagens, em virtude de serem obtidas por um único sensor e uma mesma condição atmosférica, superaria a maior qualidade espacial da fusão HRV/ETM. Apesar dos bons resultados apresentados pelo método WTVE obtidos com a avaliação espacial e espectral para o caso ETM/ETM e a

ausência de erros de registro significativos, esta hipótese foi descartada. Isto deve-se ao fato que a resolução espacial demonstrou ser um fator limitante na identificação de cicatrizes de escorregamentos com imagens ópticas orbitais.

No entanto, pode-se notar que a relação pixel-cicatriz difere sensivelmente das apresentadas por Brunsden (1993) e Mantovani et al. (1996). Estes autores mencionam que cicatrizes menores que 100 m seriam praticamente impossíveis de serem identificadas com imagens de resolução espacial da ordem de 10 m.

Na Figura 5.14, utilizando uma composição colorida 453 obtida pelo método de fusão IHS, com 10 m de resolução espacial, foi possível identificar pequenas cicatrizes de escorregamentos. Por exemplo, as cicatrizes acentuadas medem: (A) 92 m x 50 m e (B) 86 m x 51 m. Desta forma, entende-se que a identificabilidade das cicatrizes está mais relacionada ao comportamento espectral das mesmas, às suas feições típicas (relação comprimento x largura), ao comportamento espectral dos alvos circunvizinhos e às características geomorfológicas da área.

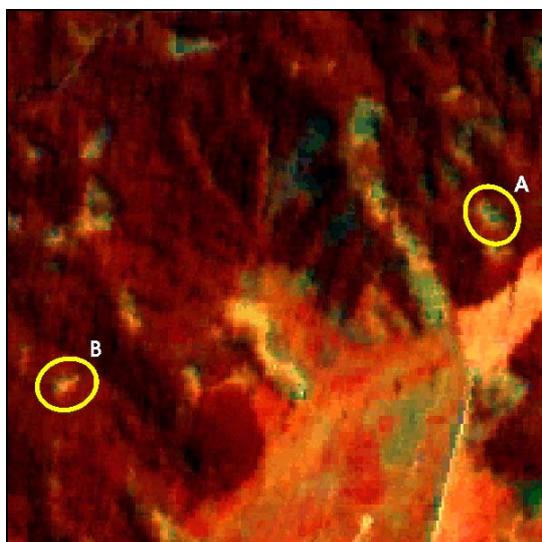


FIGURA 5.14 – Exemplos de escorregamentos possíveis de serem identificados na imagem híbrida IHS (HRV/ETM).

Concluindo, apesar dos benefícios proporcionados pelas técnicas de fusão de imagens, ainda não foi possível caracterizar tipologicamente os escorregamentos com estes dados de sensoriamento remoto. Através da interpretação visual das imagens foi possível

discriminar somente as cicatrizes em relação aos demais alvos da cena, em função da resposta espectral e da forma com que se apresentam. Sestini (2002) e Okida (1996), mesmo aplicando diversas técnicas de processamento de imagens, como ALC e operações aritméticas entre bandas (adição, multiplicação, NDVI, etc.), também concluíram que utilizando imagens do satélite Landsat 5 (30 m) é praticamente impossível classificar as cicatrizes de escorregamentos nas encostas da Serra do Mar.

No entanto, acredita-se que, as técnicas de fusão de imagens supriram as expectativas quanto à identificação das cicatrizes de escorregamento para a elaboração do mapa de inventário para a área de estudo.

5.3 Mapa de Inventário

O mapa de inventário de escorregamentos foi obtido através da interpretação visual e classificação por MAXVER da imagem IHS da área de estudo, obtida pela fusão das bandas PAN HRV e 453 ETM.

Entretanto, em função da performance deste classificador estar diretamente relacionada com a qualidade e a quantidade das amostras, realizou-se uma avaliação estatística das mesmas para verificar a qualidade da classificação adotada.

As amostras utilizadas no processo de classificação apresentaram um desempenho geral de 97,33%, o que resultou em um coeficiente Kappa de 95,42%. A confusão média foi de somente 2,67%, em relação ao número total de amostras, não havendo qualquer abstenção ou rejeição de pixels durante o processo de classificação.

Conforme Tabela 5.6, as classes que apresentaram os menores erros de classificação foram a Mata e a Água. Na classe Pastagem, apesar da maioria dos pixels terem sido classificados corretamente (98,43%), houve uma pequena confusão com as classes Escorregamento (1,12%) e Urbana (0,32%). O comportamento das amostras da classe Urbana também foi similar, apresentando uma maior confusão com as classes Pastagens (9,38%) e Escorregamentos (0,83%). Para a classe Nuvem os maiores erros foram verificados em relação as classes Mata (2,16%) e Urbana (3,32%). No entanto, de todas

as classes avaliadas, as classes Praia e Escorregamento foram as que apresentaram os maiores erros de classificação. Dos 982 pixels selecionados para a classe Praia somente 290 (29,53%) foram classificados corretamente. A classe Escorregamento apresentou uma confusão ainda maior, pois somente 18,69% dos 16.595 pixels selecionados foram classificados de maneira correta.

TABELA 5.6 – Matriz de erros de classificação.

	Ma	Pa	Ur	Ag	Nu	Pr	Es	Σ Linha
Ma	154206 99,96%	47 0,06%	0	0	337 2,16%	0	1738 10,47%	156328
Pa	25 0,02%	75250 98,43%	1395 9,38%	0	156 1,00%	12 1,22%	11464 69,08%	88302
Ur	0	247 0,32%	13266 89,20%	0	519 3,32%	680 69,25%	283 1,71%	14995
Ag	0	0	10 0,07%	401721 100,00%	129 0,83%	0	8 0,05%	401868
Nu	0	57 0,07%	77 0,52%	0	14478 92,69%	0	0	14612
Pr	0	0	2 0,01%	0	1 0,00%	290 29,53%	0	293
Es	28 0,02%	853 1,12%	123 0,83%	0	0	0	3102 18,69%	4106
Σ Col.	154259	76454	14873	401721	15620	982	16595	680504

Ma (Mata); Pa (Pastagem); Ur (Urbana); Ag (Água); Nu (Nuvem); Pr (Praia) e Es (Escorregamento). As colunas representam os dados de referência.

Estes erros apresentados pelas classes Praia e Escorregamento, conforme Tabela 5.7, resultaram em uma baixíssima exatidão do produtor para ambas as classes, isto é, 29,53% e 18,69%, respectivamente. No entanto, apesar deste resultado, a exatidão do

usuário alcançou excelentes índices, tanto para a classe Praia (98,98%) quanto para a classe Escorregamento (75,55%). Estes índices demonstram que, mesmo com a confusão existente com algumas classes, a maioria dos pixels que aparecem na classificação como praia e escorregamento realmente pertencem às classes de mesmo nome.

TABELA 5.7 – Avaliação da exatidão do produtor e do usuário.

	Exatidão do Produtor (%)	Exatidão do Usuário (%)
Mata	99,97	98,64
Pastagem	98,43	85,22
Urbana	89,20	88,47
Água	100,00	99,96
Nuvem	92,69	99,08
Praia	29,53	98,98
Escorregamento	18,69	75,55

Apesar do bom resultado apresentado pela classificação, optou-se por reclassificar a imagem MAXVER com o intuito de facilitar a identificação dos escorregamentos. Com base nos resultados da Tabela 5.6, foram associadas as classes Mata, Pastagem e Urbana, passando a ser denominada como Outros, por serem as que apresentaram maior confusão com a classe Escorregamento. O mesmo procedimento foi adotado também para as classes Nuvem e Praia, que passaram a se chamar Nenhuma.

Vale a pena destacar que a classe que apresentou maior confusão com a classe Escorregamento foi a Pastagem, ou seja, 11.464 pixels (69%) foram classificados erroneamente como pertencente a classe Pastagem (Tabela 5.6). Isto deve-se a grande similaridade espectral entre estes alvos. Conforme Figura 5.15, esta similaridade entre as cicatrizes (a) e as áreas de pastagem na área de estudo foi verificada tanto no planalto (b) quanto na planície litorânea (c).

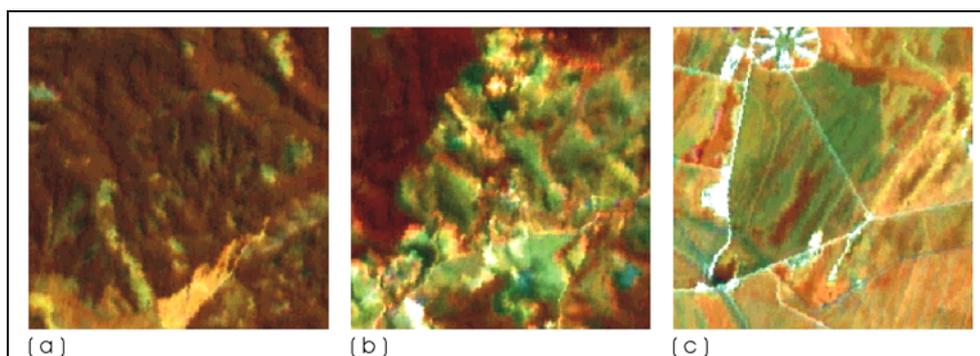


FIGURA 5.15 – Similaridade espectral entre as cicatrizes de escorregamento (a) e as áreas de pastagens no planalto (b) e na planície litorânea (c).

A maioria das cicatrizes de escorregamentos existentes na área de estudo é decorrente do evento catastrófico de março de 1967 (Cruz, 1974). Apesar do longo período de pousio (36 anos), a regeneração da cobertura vegetal foi retardada devido à mobilização do manto vegetal e do solo coluvial. Em alguns casos, onde os processos foram mais intensos, houve a remoção dos horizontes mais subjacentes, como os solos de alteração, deixando à vista os afloramentos descontínuos do maciço rochoso (Wolle et al, 1977; Wolle e Carvalho, 1989).

Desta forma, presencia-se na maioria das cicatrizes uma camada de solo saprolítico residual, que por ser um solo jovem e pouco evoluído, carece de nutrientes necessários para o desenvolvimento de uma cobertura vegetal mais robusta (Wolle et al., 1977). Nestes locais ocorre o povoamento espontâneo de espécies pioneiras, que correspondem ao primeiro estágio sucessional da cobertura vegetal secundária, ou seja, instalou-se um pequeno grupo de plantas herbáceas heliófitas, pouco exigentes quanto às condições edáficas. Klein (1979), analisando o comportamento da Mata Atlântica, cita que em encostas com solos rasos, enxutos e cansados, instalam-se inicialmente gramíneas, como o capim-sapé (*Imperata brasiliensis*), o capim-melado (*Melinis minutiflora*) e o capim-rabo-de-burro (*Andropogon bicornis*); e ervas, como a erva-gorda (*Erechthides valerianaefolia*), o caruru-de-cacho (*Phytolacca thyrsiflora*) e, principalmente, a samambaia-das-taperas (*Pteridium aqualinum*).

Nas saídas a campo na área de estudo, foi possível verificar que grande parte das cicatrizes estão cobertas por gramíneas e samambais-das-taperas (Figura 5.16),

inclusive as cicatrizes mais antigas, do evento de março de 1967, como as encontradas ao longo da Rodovia Tamoios (Figura 5.17). Este fato também foi observado por Sestini (2002), com exceção das cicatrizes que apresentam rochas de base exposta.



FIGURA 5.16 – Escorregamentos com rocha exposta (A), samambaia-das-taperas (B) e gramíneas (C).
FONTE: adaptada de Sestini (2002).



FIGURA 5.17 – Escorregamentos ao longo da Rodovia dos Tamoios: (A) em 1967 com solo exposto e (B) em 2002 coberta por gramíneas e vegetação herbácea.
FONTE: adaptada de Cruz (1974) e Sestini (2002).

A confusão entre as classes Pastagens e Escorregamento, em virtude da similaridade espectral entre estes alvos, afetou relativamente a classificação MAXVER. No entanto,

como já observado, a exatidão do usuário foi muito boa (75,55%) para a classe Escorregamento (Tabela 5.7). Isto significa que a maioria dos pixels na imagem classificada foram realmente classificados como pertencentes a esta classe.

Assim, através da análise simultânea da imagem fundida IHS e da classificada MAXVER, foram possíveis identificar 497 escorregamentos (Figura 5.18). Cruz (1974) e De Ploey e Cruz (1979) comentam que a maioria dos escorregamentos ocorridos em março de 1967 em Caraguatatuba (SP) foram os translacionais (*translational landslide*), com alguns casos de fluxos de lama (*mudflows*) e de fluxos de detritos (*debris flow*).

Grande parte destes escorregamentos ficaram concentrados nas bacias hidrográficas dos rios Guaxinduba, Santo Antônio e Juqueriquerê. Esta configuração espacial das ocorrências de escorregamentos no município de Caraguatatuba (SP) assemelha-se à apresentada por Guidici e Nieble (1993). Isto demonstra que as técnicas empregadas para a identificação das cicatrizes como intuito de elaborar um mapa de inventário apresentaram-se bastante eficientes.

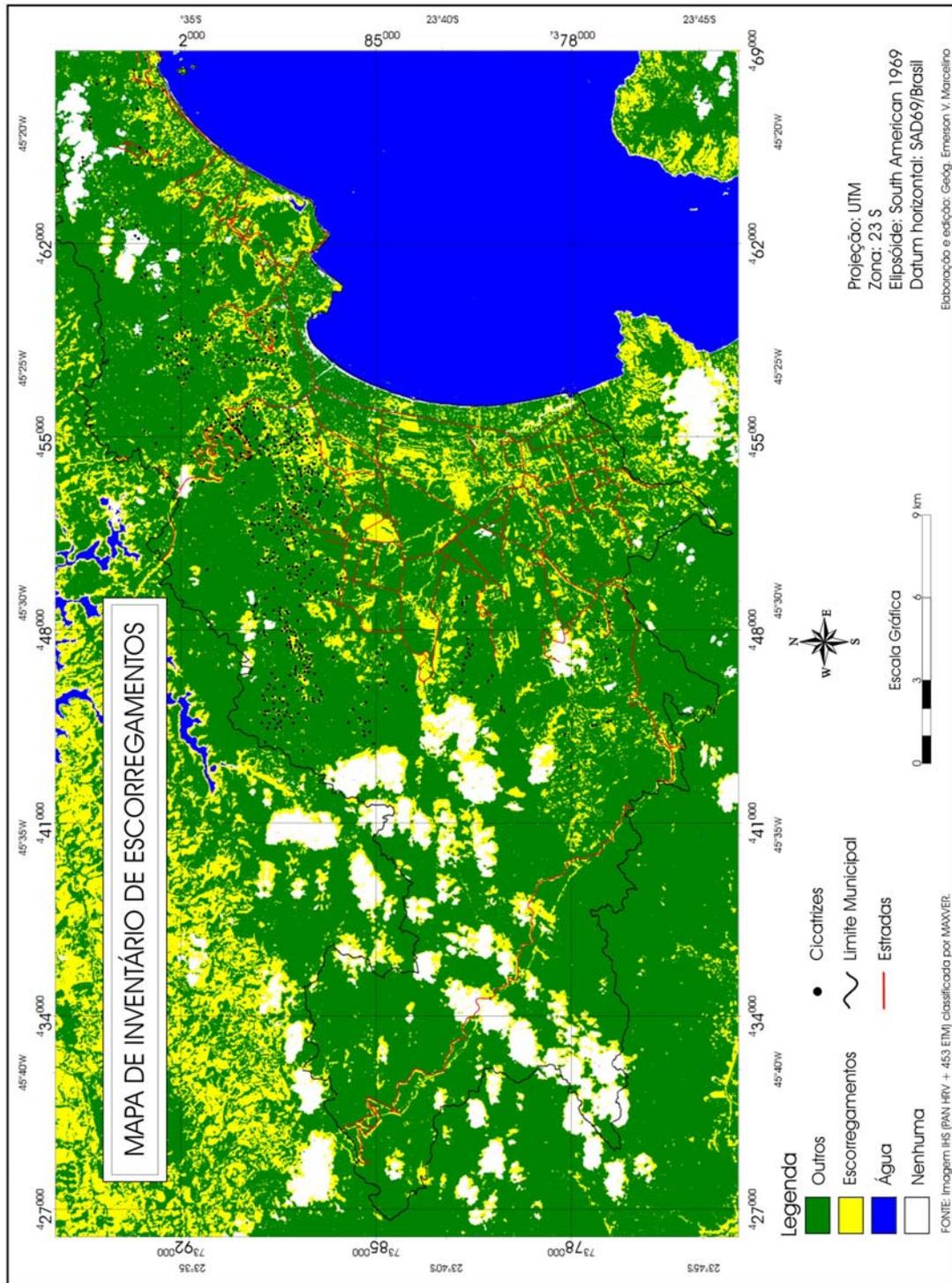


Figura 5.18 - Mapa de inventário de escorregamentos.

5.4 Correlação entre os Escorregamentos e os Parâmetros Geoambientais

O cruzamento dos dados de escorregamentos com os diversos parâmetros geoambientais da área de estudo foi realizado com o intuito de compreender as causas e mecanismos que levam à deflagração dos escorregamentos. Além do que, esta correlação permitiu a devida extração de pesos que foram utilizados na ponderação dos parâmetros geoambientais para o mapeamento das áreas mais susceptíveis à ocorrência de escorregamentos.

Nesta pesquisa, dos 497 escorregamentos levantados, 100 foram selecionados aleatoriamente para validar os mapas de susceptibilidade gerados pelas diversas técnicas de inferência geográfica. Os demais foram correlacionados com os nove parâmetros geoambientais: Hipsometria; Declividade; Orientação de encostas; Distâncias de rios, estradas e lineamentos; Geologia; Pedologia; e Uso e cobertura da terra.

5.4.1 Correlação entre Hipsometria e Escorregamentos

Na Tabela 5.8, verifica-se que a maior frequência de escorregamentos, cerca de 42,57%, ocorreram entre 100 e 300 m de altitude, com destaque para a classe 100 - 200 m (21,41%). Ressalta-se que no intervalo de 50 a 500 m ocorreu a maior parte dos escorregamentos (333), representando 83,88% do total das cicatrizes identificadas. Esta faixa corresponde às médias encostas onde o manto de intemperismo é mais espesso do que nas altas encostas e está associado à alta declividade e densidade de drenagem, o que favorece a ocorrência dos escorregamentos (Cruz, 1974). Mesmo sendo estas classes as mais propensas a ocorrências de escorregamentos, não foram as que apresentaram a maior área.

As Figuras 5.19 e 5.20 demonstram que a classe com maior área foi de 0 – 20 m (24,76%). Esta classe, em grande parte, corresponde à planície litorânea da área de estudo, onde a probabilidade de ocorrência de escorregamentos é praticamente nula devido ao relevo plano e às baixas declividades.

TABELA 5.8 – Correlação entre classes de hipsometria e frequência de escorregamentos.

Classes	Escorregamentos	Classes	Escorregamentos
0 – 20 m	4 (1,01%)	600 – 700 m	12 (3,02%)
20 – 50 m	14 (3,53%)	700 – 800 m	5 (1,26%)
50 – 100 m	46 (11,59%)	800 – 900 m	2 (0,50%)
100 – 200 m	85 (21,41%)	900 – 1000 m	0 (0%)
200 – 300 m	84 (21,16%)	1000 – 1100 m	0 (0%)
300 – 400 m	68 (17,13%)	1100 – 1200 m	0 (0%)
400 – 500 m	50 (12,59%)	1200 – 1300 m	0 (0%)
500 – 600 m	27 (6,80%)	> 1300 m	0 (0%)

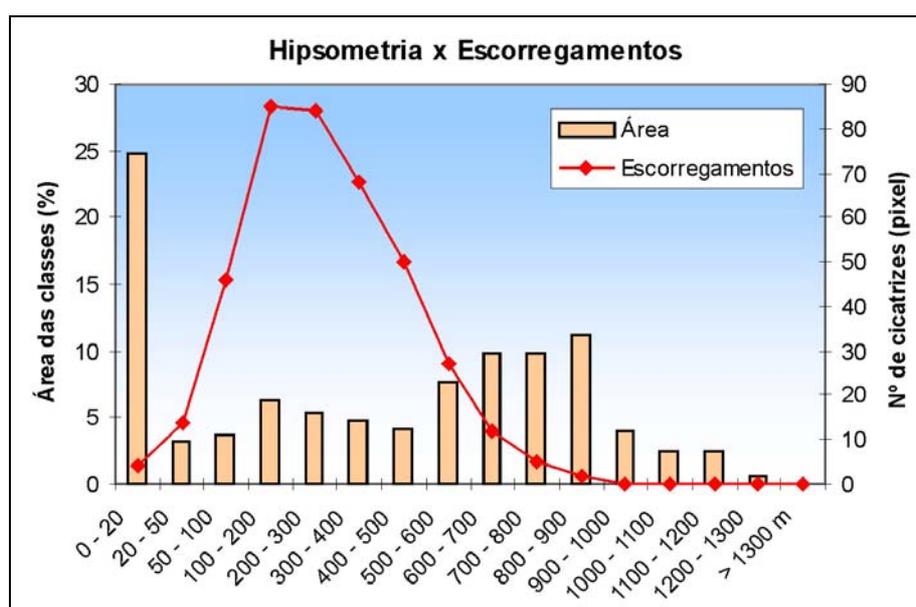


FIGURA 5.19 – Correlação entre classes de hipsometria e frequência de escorregamentos.

Outro fato a ser destacado é a ausência de cicatrizes para as classes acima de 900 m (Tabela 5.8). Nesta altitude é que ocorre geralmente a ruptura de declive, separando as encostas íngremes da Serra do Mar das áreas de morraria do planalto. Nestas áreas predomina o relevo colimado (colinas e morretes), onde a probabilidade de ocorrência

de escorregamentos é relativamente menor, devido principalmente as baixas declividades (em torno de 15%).

Estes dados vêm confirmar as observações realizadas por Sestini (2000) e Wolle e Carvalho (1989). Sestini (2000), analisando as encostas da Serra do Mar no município de Caraguatatuba, verificou que houve um predomínio de cicatrizes na faixa de 100 – 300 m de altitude, e uma incidência nula a baixa para as faixas de 0 – 100 e acima de 900 m. Já Wolle e Carvalho (1989) citam que na porção da Serra do Mar, próximo às cidades de Cubatão e Santos, os escorregamentos translacionais também predominaram nas médias encostas.

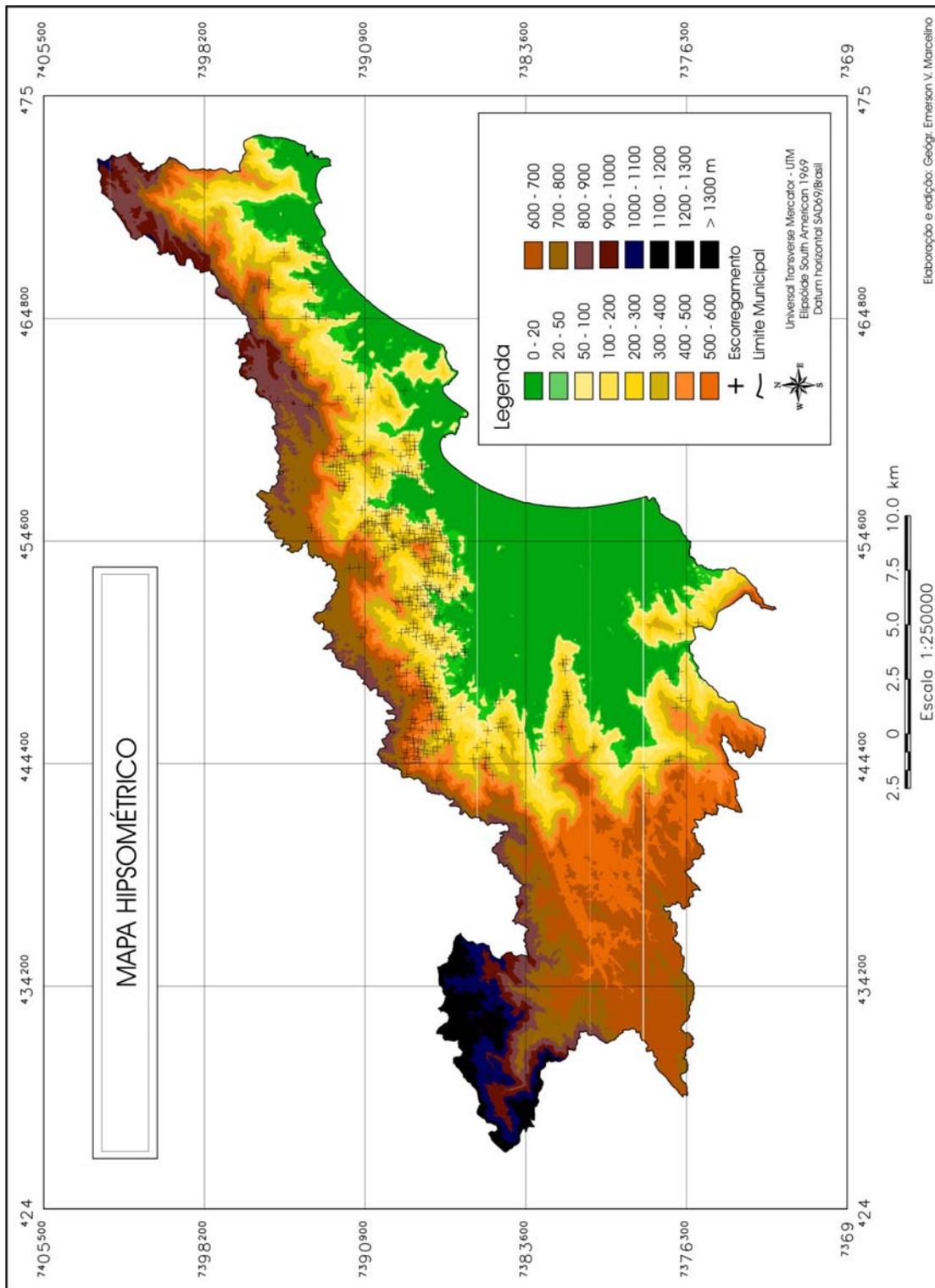


Figura 5.20 - Mapa hipsométrico.

5.4.2 Correlação entre Declividade e Escorregamentos

A classe de declividade que apresentou a maior quantidade de escorregamentos (66,25%), conforme a Tabela 5.9, foi a 47 – 100 %. Esta faixa apresenta uma elevada probabilidade de ocorrência de escorregamentos devido à presença de encostas íngremes, com ângulos entre 25,2° e 45°. Estes altos valores de declividade potencializam a atuação da força de gravidade sobre o manto de intemperismo, diminuindo a resistência ao cisalhamento. Esta classe, que cobre grande parte das encostas da Serra do Mar, apresentou uma frequência média praticamente quatro vezes superior à classe 30 – 47%, que apresentou a segunda maior incidência de cicatrizes.

Apesar da declividade ser mais acentuada na classe > 100%, ocorreram pouquíssimos escorregamentos (5,79%) (Tabela 5.9). Isto se deve à pouca profundidade do manto de intemperismo existente nas altas encostas, que diminui a probabilidade de desencadear escorregamentos em função da pouca capacidade de retenção de água e diminuição da componente peso no locais correspondentes a esta classe de declividade.

Nas Figuras 5.21 e 5.22 nota-se que a classe 0 – 5% foi a que apresentou a maior área, cobrindo 29,70% da área de estudo. Grande parte desta faixa corresponde a planície litorânea, com algumas pequenas áreas no planalto, onde o relevo é aplainado, com instabilidade nula a baixa.

TABELA 5.9 – Correlação entre classes de declividade e frequência de escorregamentos.

Classes	Escorregamentos
0 – 5 % (2,9°)	10 (2,52%)
5 – 12 % (6,8°)	7 (1,76%)
12 – 30 % (16,7°)	25 (6,30%)
30 – 47 % (25,2°)	69 (17,38%)
47 – 100 % (45°)	263 (66,25%)
> 100 %	23(5,79%)

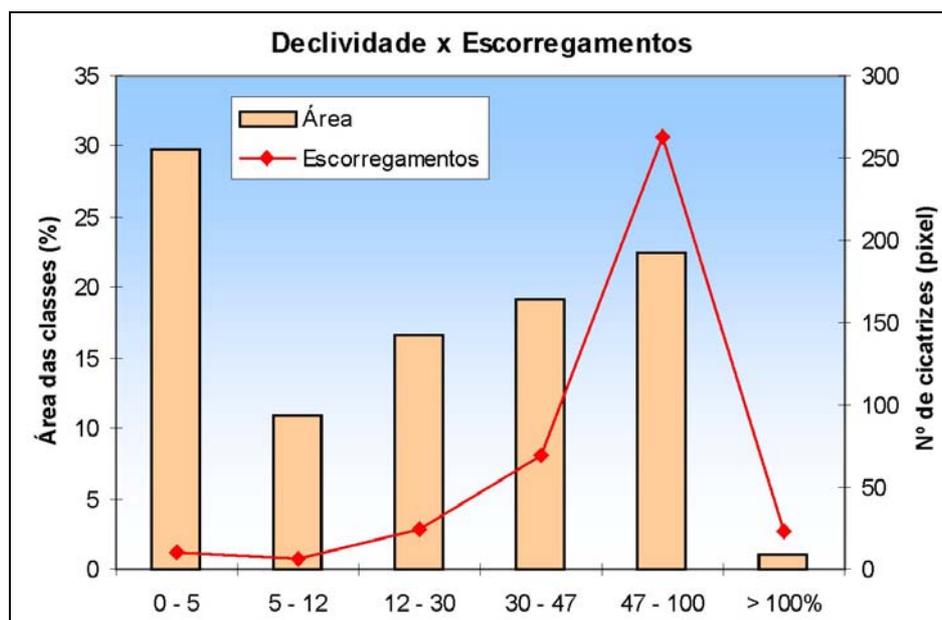
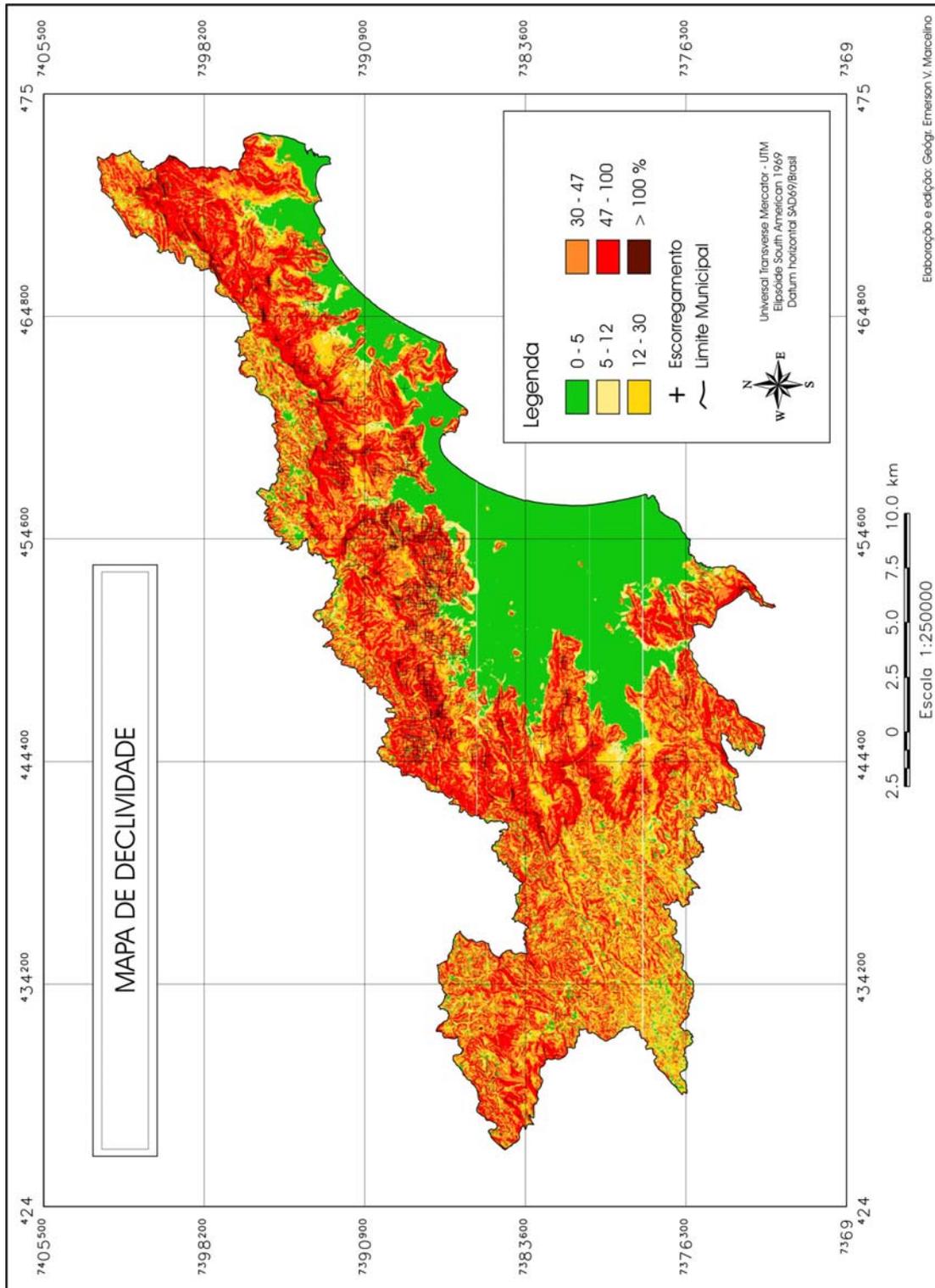


FIGURA 5.21 – Correlação entre classes de declividade e frequência de escorregamentos.

Cruz (1975), analisando a evolução das vertentes nas escarpas da Serra do Mar em Caraguatatuba/SP, verificou uma predominância significativa de escorregamentos em declividades acima de 40% (22°) nas encostas da bacia do rio Santo Antônio.

De Ploey e Cruz (1979), analisando os escorregamentos ocorridos na mesma área no evento catastrófico de 1967, concluíram que estes concentraram-se principalmente em encostas com declividade acima de 20°. Entretanto, em algumas áreas, como no Morro do Tinga, alguns escorregamentos ocorreram também em declividades em torno de 40°.

Em pesquisas recentes nas encostas da Serra do Mar, Sestini (2000) identificou que a maior quantidade de cicatrizes de escorregamentos ocorreu na faixa de 17° a 32°. Entretanto, os dados apresentados por Wolle e Carvalho (1989), também demonstram que nas áreas afetadas pelos escorregamentos predominam encostas com inclinações entre 35° a 45°. Cruz (1974) conclui que o predomínio de elevados declives impulsionou a ocorrência dos movimentos de massa, independentemente aos fatores cobertura florestal ou ocupação humana. Na serra de Caraguatatuba, os escorregamentos foram decisivamente mais governados pelos declives e elevados índices de precipitação, do que pela natureza das rochas ou por outros parâmetros geoambientais.



Elaboração e edição: Geógr. Emerson V. Marcelino

Figura 5.22 - Mapa de declividade.

5.4.3 Correlação entre Orientação das Encostas e Escorregamentos

De acordo com a Tabela 5.10, grande parte dos escorregamentos ocorre nas encostas voltadas para a direção SE, onde foram identificadas 101 cicatrizes (25,44%). É necessário destacar que este parâmetro também influenciou na ocorrência de escorregamentos, visto que 61,21% de todas as cicatrizes foram identificadas nas encostas viradas para os quadrantes E e S.

Apesar da frequência de escorregamentos na área de estudo estar vinculada também a área da classe (Figuras 5.23 e 5.24), as classes E, SE e S destacaram-se das demais. Sestini (2000) verificou este mesmo comportamento em relação a esta variável geoambiental. O autor também identificou que as encostas com frequências de escorregamentos mais elevadas eram voltadas para a direção SE.

Destaca-se também, na Figura 5.24, a ausência de informações (polígonos brancos) em algumas áreas da planície litorânea, devido as limitações computacionais do software SPRING utilizado para a produção deste PI.

TABELA 5.10 – Correlação entre classes de orientação das encostas e frequência de escorregamentos.

Classes	Escorregamentos
N	33 (8,31%)
NE	33 (8,31%)
E	70 (17,63%)
SE	101 (25,44%)
S	72 (18,14%)
SW	24 (6,05%)
W	12 (3,02%)
NW	52 (13,10%)

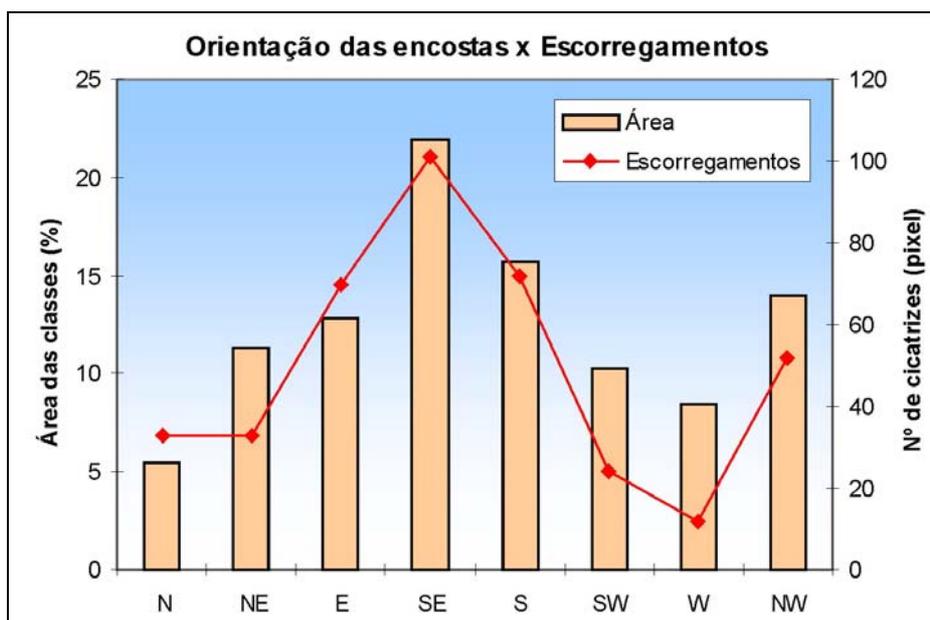


FIGURA 5.23 – Correlação entre classes de orientação das encostas e frequência de escorregamentos.

Isto vem confirmar as observações realizadas por Donati e Turrini (2002) e Dai e Lee (2002). Eles destacam que a orientação das encostas afeta indiretamente a resistência ao cisalhamento, em função da quantidade de precipitação e de umidade, que está vinculada à direção dos ventos e à insolação.

Na área de estudo, conforme Gutjahr et al. (2000), o clima úmido das vertentes do litoral norte paulista é controlado pelas massas de ar Tropical Marítimo (mT) e Polar Atlântico (mP), onde a direção NE-SO da Serra do Mar é responsável pelo elevado índice de precipitação devido ao efeito orográfico, até mesmo na estação do inverno. Estes índices estão ligados à barreira topográfica representada pelas escarpas da serra e aos ventos oriundos do quadrante S. Além disso, a umidade provinda do oceano pela brisa marítima, assim como a menor incidência de raios solares nas vertentes voltadas para o quadrante E, favorecem o aumento da umidade no solo. Conseqüentemente, quando associada com precipitações intensas, ocorre o rápido encharcamento do solo, diminuindo as tensões cisalhantes e ocasionando escorregamentos generalizados.

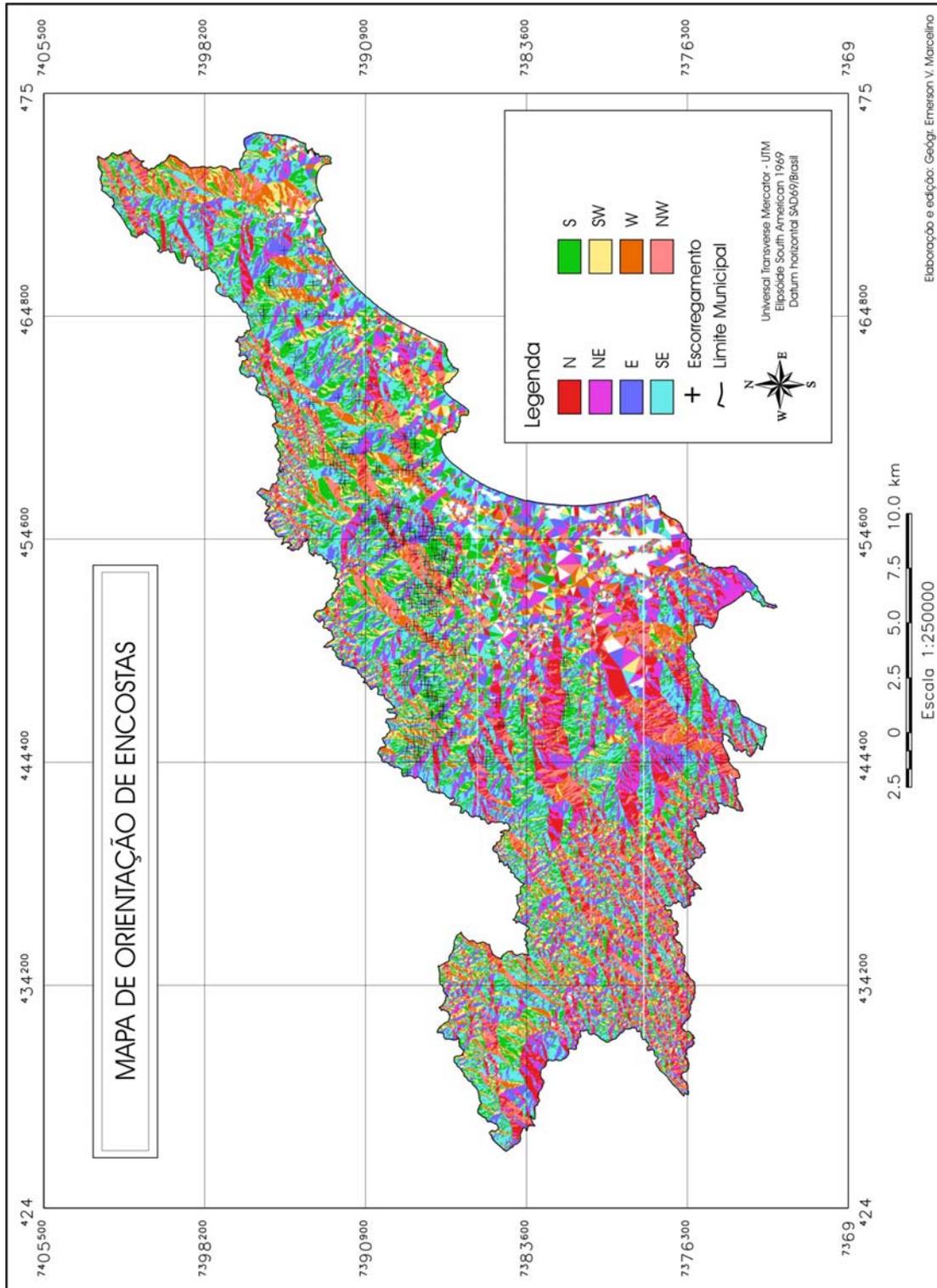


Figura 5.24 - Mapa de orientação de encostas

5.4.4 Correlação entre Distâncias de Rios e Escorregamentos

Nota-se, na Tabela 5.11, que este parâmetro também apresentou alta correlação com a incidência de escorregamentos, principalmente para a faixa de 0 – 200 m (72,29%). Além disso, esta faixa cobre somente 21,55% da área total do município de Caraguatatuba (Figuras 5.25 e 5.26), o que demonstra a grande concentração de cicatrizes de escorregamentos.

A classe que apresentou a maior quantidade de escorregamentos foi a 0 – 100 m (40,30%). Nas demais classes, conforme aumentou a distância em relação aos rios, ocorreu proporcionalmente um decréscimo gradativo da incidência de escorregamentos.

TABELA 5.11 – Correlação entre classes de distâncias de rios e frequência de escorregamentos.

Classes	Escorregamentos
0 – 100 m	160 (40,30%)
100 – 200 m	127 (31,99%)
200 – 300 m	60 (15,11%)
300 – 400 m	26 (6,55%)
400 – 500 m	15 (3,78%)
> 500 m	9 (2,27%)

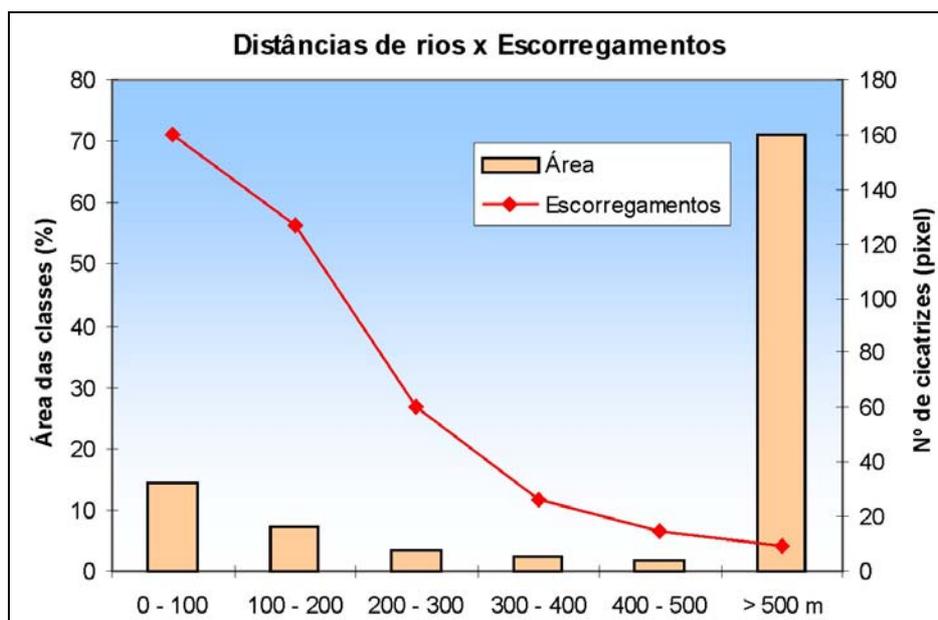


FIGURA 5.25 – Correlação entre classes de distâncias de rios e freqüência de escorregamentos.

Estas observações coincidem com as colocações de Temesgen et al (2001), nas quais os autores afirmam que a proximidade com os cursos d'água está diretamente vinculada à forma da encosta, à umidade e à formação de sulcos e ravinas. Nestas áreas as encostas apresentam-se geralmente em seções côncavas, que por serem zonas de convergência de fluxos d'água (superficiais e sub-superficiais), favorecem a condição de saturação do solo e intensificam a atuação dos processos erosivos, podendo gerar até movimentos de massa. Ressalta-se que este parâmetro foi utilizado com o intuito de correlacionar os escorregamentos à forma das encostas, visto que o SPRING ainda não permite gerar estes dados.

Sestini (2000) cita que as encostas côncavas e convexas apresentaram as maiores incidências de cicatrizes, sendo que estas últimas foram ligeiramente superiores às côncavas. O autor comenta que este resultado pode estar relacionado ao fato de que as formas convexas onde foram identificadas as cicatrizes podem estar associadas a elementos côncavos das vertentes. Okida (1996), analisando as áreas sujeitas a movimentos gravitacionais de massa em Caraguatatuba, também conclui que as áreas mais propensas a escorregamentos estão relacionadas com encostas convexo-côncavas e convexo-retilíneo-côncavas.

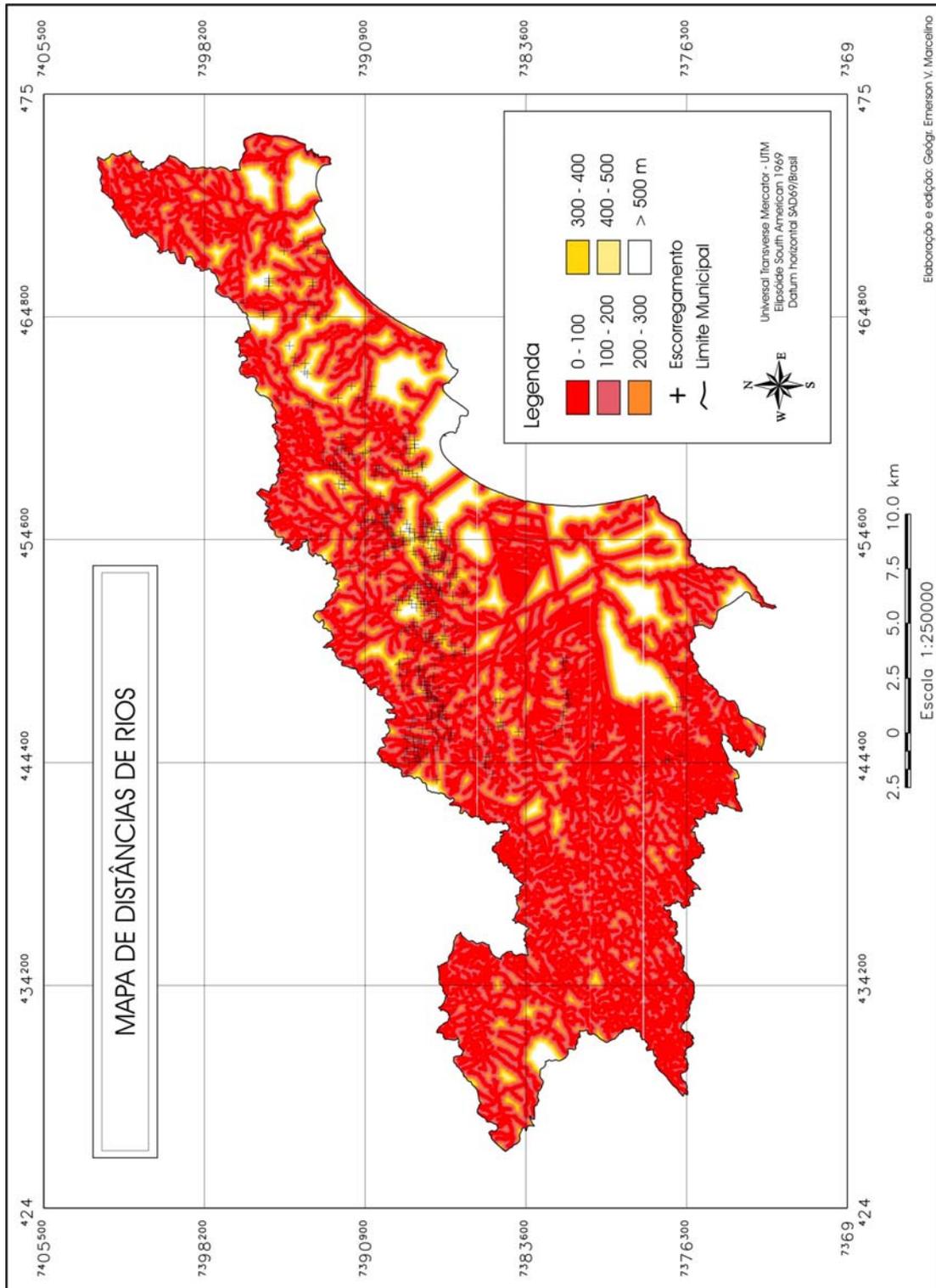


Figura 5.26 - Mapa de distâncias de rios

5.4.5 Correlação entre Distâncias de Estradas e de Lineamentos e Escorregamentos

Supõe-se que, quanto mais próximo das estradas e lineamentos, maior é a incidência de escorregamentos, devido aos cortes nas encostas e aos caminhos preferenciais de alteração das rochas (planos de fraqueza). Entretanto, verificou-se que, na área de estudo, conforme Tabelas 5.12 e 5.13, não houve predominância de escorregamentos nas classes mais próximas para ambos os parâmetros.

A maior incidência ocorreu para a classe > 500 m, com 71,03% (282) e 31,23% (124) das cicatrizes, respectivamente. Entretanto, mesmo para estas classes, a incidência foi baixa em virtude do tamanho das mesmas (Figuras 5.27, 5.28, 5.29 e 5.30). Com relação às distâncias de estradas e de lineamentos, esta classe cobre 89,88% e 87,26% da área de estudo, respectivamente.

TABELA 5.12 – Correlação entre classes de distâncias de estradas e frequência de escorregamentos.

Classes	Escorregamentos
0 – 100 m	25 (6,30%)
100 – 200 m	26 (6,55%)
200 – 300 m	26 (6,55%)
300 – 400 m	21 (5,29%)
400 – 500 m	17 (4,28%)
> 500 m	282 (71,03%)

TABELA 5.13 – Correlação entre classes de distâncias de lineamentos e frequência de escorregamentos.

Classes	Escorregamentos
0 – 100 m	65 (16,37%)
100 – 200 m	67 (16,88%)
200 – 300 m	51 (12,85%)
300 – 400 m	54 (13,60%)
400 – 500 m	36 (9,07%)
> 500 m	124 (31,23%)

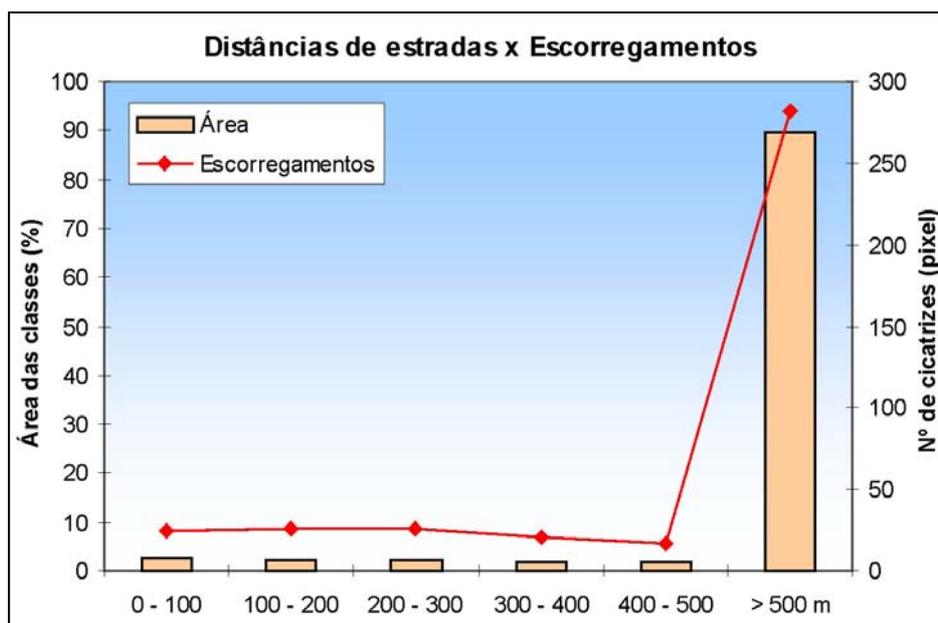


FIGURA 5.27 – Correlação entre classes de distâncias de estradas e frequência de escorregamentos.

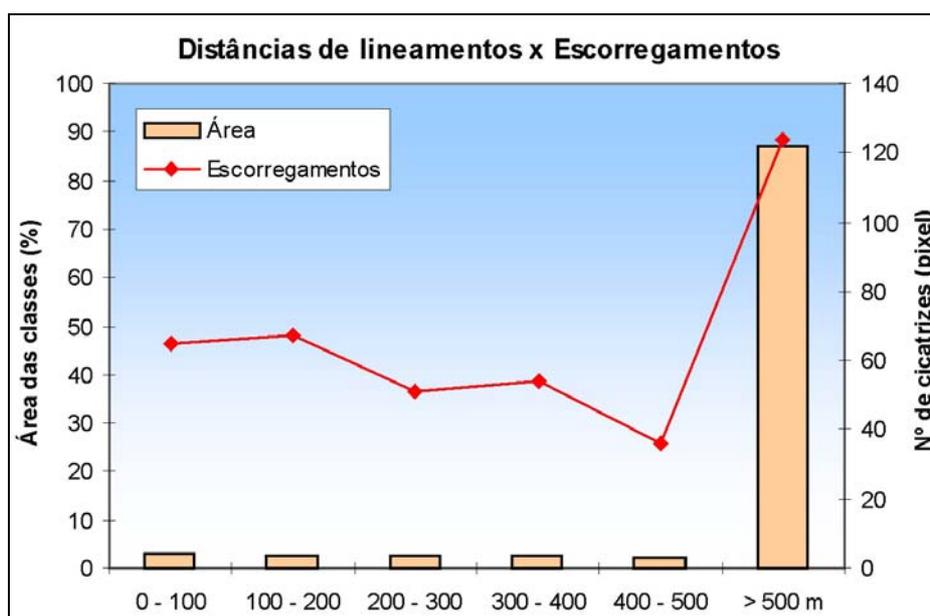


FIGURA 5.28 – Correlação entre classes de distâncias de lineamentos e freqüência de escorregamentos.

Conclui-se, desta forma, que estes parâmetros não influenciaram a ocorrência de escorregamentos, devido à maior quantidade de arruamentos estar localizada na planície litorânea (área urbana) e aos poucos lineamentos contidos no PI do banco de dados. Com relação aos lineamentos, Okida (1996) cita que a ocorrência de escorregamentos nesta área está fortemente controlada por estas estruturas geológicas (áreas com grande variação de atitudes de estruturas, com alta freqüência de traços de fraturas e intersecção de vários lineamentos estruturais).

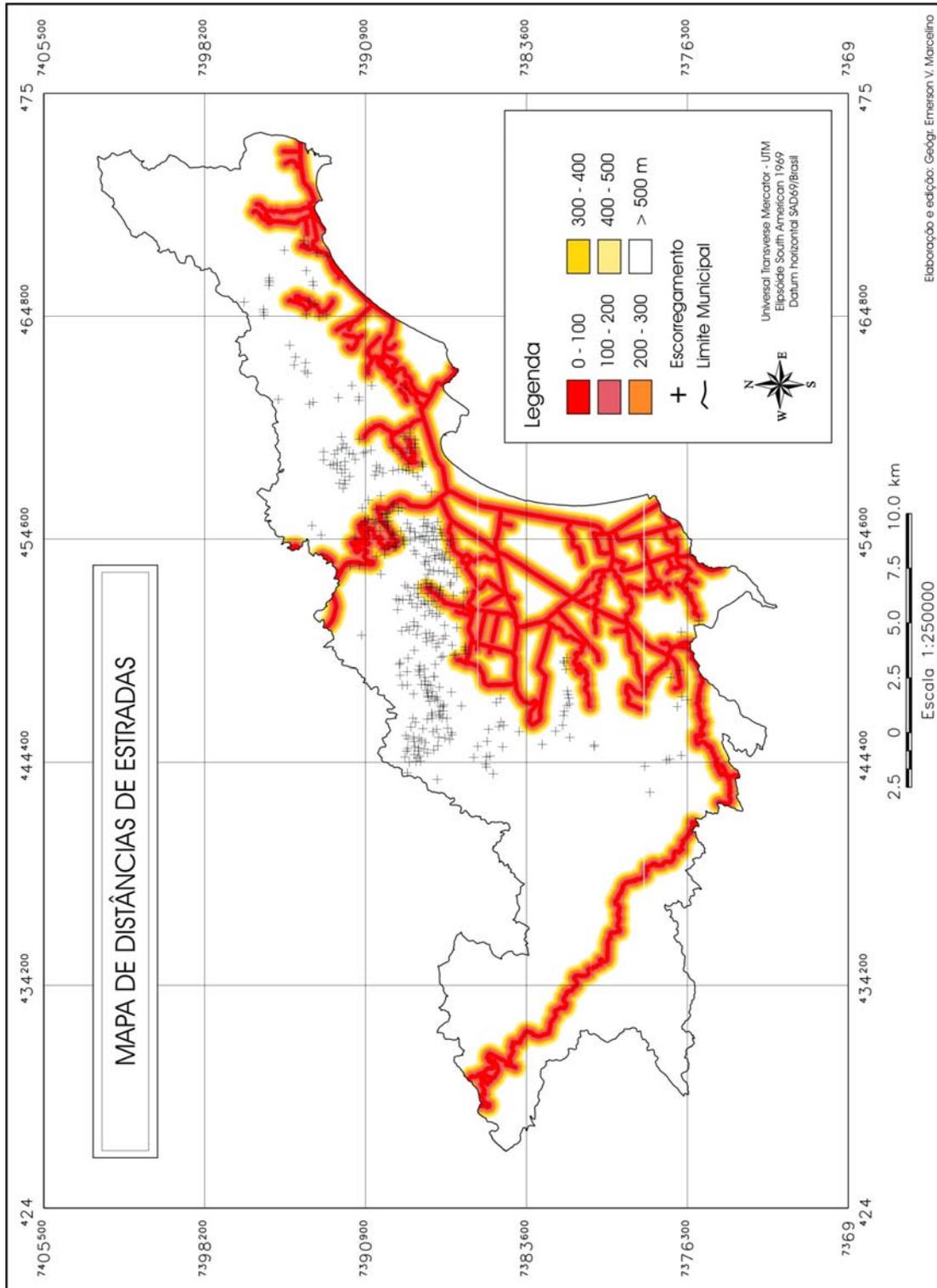
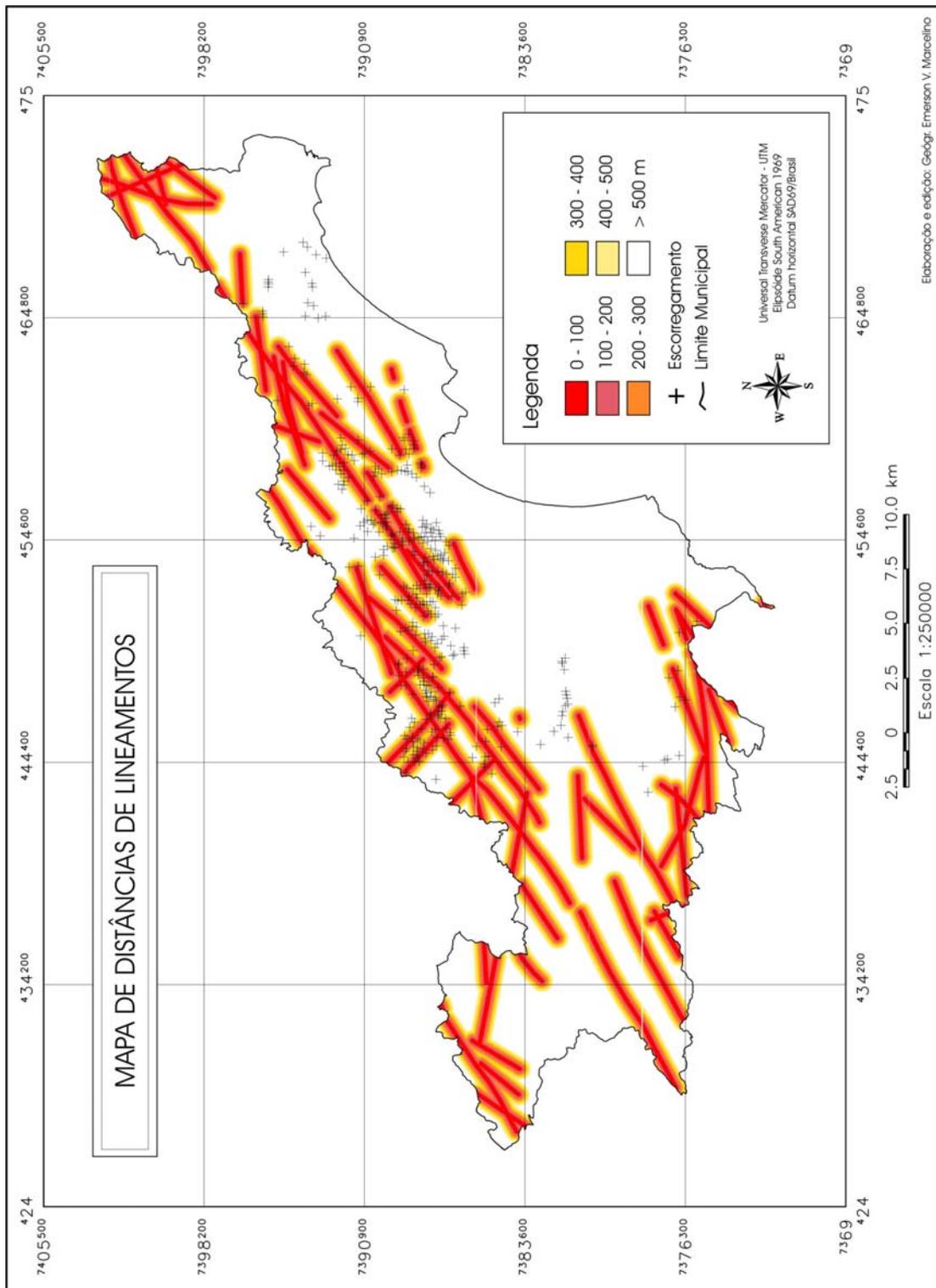


Figura 5.29 - Mapa de distâncias de estradas.



Elaboração e edição: Geógr. Emerson V. Marcelino

Figura 5.30 - Mapa de distâncias de lineamentos

5.4.6 Correlação entre Geologia e Escorregamentos

Verifica-se na Tabela 5.14 que a maioria dos escorregamentos ocorreu na classe composta por granitóides (87,15%), enquanto que na classe Migmatito ocorreu somente 7,05%. Os depósitos de encostas também apresentaram uma baixa incidência de escorregamentos (4,03%), em virtude dos ângulos de inclinação destas zonas serem mais suaves. Com relação à ocorrência de escorregamentos na classe sedimentos continentais (1,76%), acredita-se que estejam relacionados à distorção geométrica do PI, pois o relevo plano destas áreas não possibilita a ocorrência de movimentos de massa.

Mesmo ocupando grande parte do área do município (47,39%), as rochas graníticas e gnaisses graníticos apresentaram uma correlação significativamente maior que a dos migmatitos (Figuras 5.31 e 5.32).

TABELA 5.14 – Correlação entre classes de geologia e frequência de escorregamentos.

Classes	Escorregamentos
Granitóides	346 (87,15%)
Migmatitos	28 (7,05%)
Depósitos de encosta	16 (4,03%)
Sedimentos continentais	7 (1,76%)
Sedimentos fluvio-lagunares	0 (0%)
Sedimentos marinhos Fm Cananéia	0 (0%)
Sedimentos marinhos	0 (0%)
Depósitos litorâneos	0 (0%)

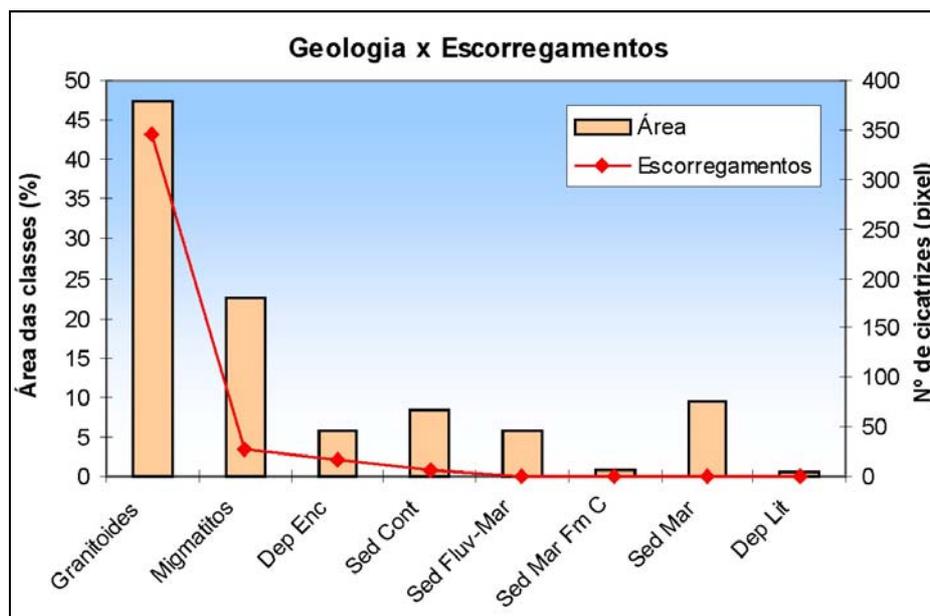
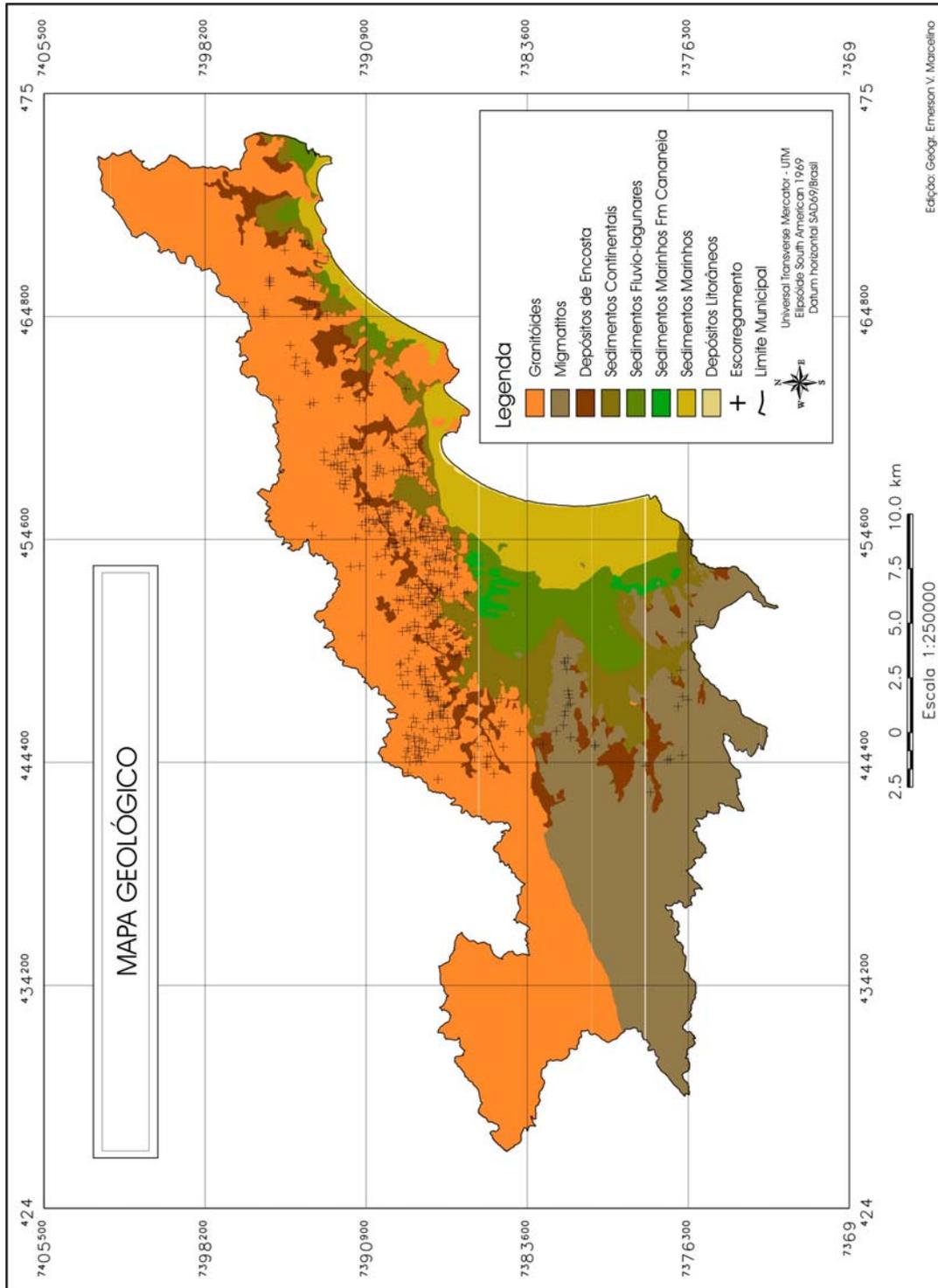


FIGURA 5.31 – Correlação entre classes de geologia e freqüência de escorregamentos.

Cunha e Guerra (1996) citam que a natureza geológica instável pode estar diretamente associada à fraqueza estrutural (falhas e fraturas) e a fragilidade da composição litológica, associada a um alto grau de intemperismo.

Okida (1996) cita que a ocorrência dos escorregamentos na área de estudo está mais vinculada a estruturas disjuntivas regionais, em função de sua direção (NE-SW), do que aos litotipos. Segundo a autora, as encostas paralelas às direções de fraturamento ou foliações favorecem os escorregamentos translacionais ou o tombamento de blocos devido à pressão do fluxo d'água (percolação), principalmente na área formada pelos granitóides.

Além disso, Okida (1996) constatou que os litotipos não apresentam forte relação com a ocorrência dos movimentos de massa, visto serem rochas predominantemente de composição granítica. Segundo a autora, a única diferenciação que pode ser efetuada é quanto à intensidade de estruturação dos mesmos. Desta forma, áreas com gnaises intensamente foliados localmente granitizados são mais susceptíveis a quedas de blocos estruturados em lascas ou cunhas. Enquanto que nas áreas com granitos ou granito gnaisse pouco ou mediamente foliados são mais susceptíveis a quedas de blocos romboédricos.



Edição: Geógr. Emerson V. Marcelino

Figura 5.32 - Mapa geológico.
 FONTE: adaptada de Crepani e Medeiros (2001).

5.4.7 Correlação entre Pedologia e Escorregamentos

Na área de estudo houve uma predominância significativa de escorregamentos (93,20%) na classe Cambissolo (Tabela 5.15). Além disso, é o tipo de solo predominante, cobrindo 43,82% do município de Caraguatatuba (Figuras 5.33 e 5.34). Segundo IPT (2000), estes solos ocorrem associados a relevos intensamente movimentados, em encostas com alta declividade, escarpas e serras. Constituem-se de solos com horizonte B incipiente, parcialmente evoluído, mas não o suficiente para alterar os constituintes de fácil intemperização (feldspatos e micas).

TABELA 5.15 – Correlação entre classes de pedologia e frequência de escorregamentos.

Classes	Escorregamentos
Cambissolo	370 (93,20%)
Latossolo Vermelho Amarelo + Cambissolo	4 (1,01%)
Espodosolo + Neossolo	7 (1,76%)
Neossolo Regolítico	16 (4,03%)
Praia	0 (0%)

Na classe Latossolo Vermelho Amarelo + Cambissolo, apesar de cobrir 26,60% da área de estudo (Figuras 5.33 e 5.34), ocorreram poucos escorregamentos, por estarem associados às áreas de colinas e morros do planalto. A classe Neossolo Regolítico, representa os escorregamentos associados aos depósitos de encostas e a classe Espodosolo + Neossolo aos sedimentos costeiros.

Guerra e Botelho (1998) citam que o grau de susceptibilidade do Cambissolo é variável, dependendo diretamente da sua profundidade, da declividade do terreno, do teor de silte e do gradiente textural. Com relação à profundidade, os autores comentam que os mais rasos tendem a ser mais susceptíveis a escorregamentos translacionais, devido à presença de camada impermeável, representada pelo substrato rochoso, mais próxima da superfície.

IPT (2000) menciona também que, em relação a este parâmetro geoambiental, o principal condicionante é a espessura do manto de intemperismo. Desta forma, os solos mais susceptíveis são os Cambissolos associados a Latossolos que recobrem as encostas íngremes, onde a cobertura laterítica superficial é rasa (até 2 m) e o saprolito muito espesso (mais de 10 m).

Cruz (1974) cita que nestas encostas, com declives mais acentuados, muitas vezes o manto superficial está em contato direto com a rocha sã ou quase sã (saprolito). Basicamente, é neste contato que ocorre o escoamento sub-superficial, formando uma zona preferencial de escorregamentos.

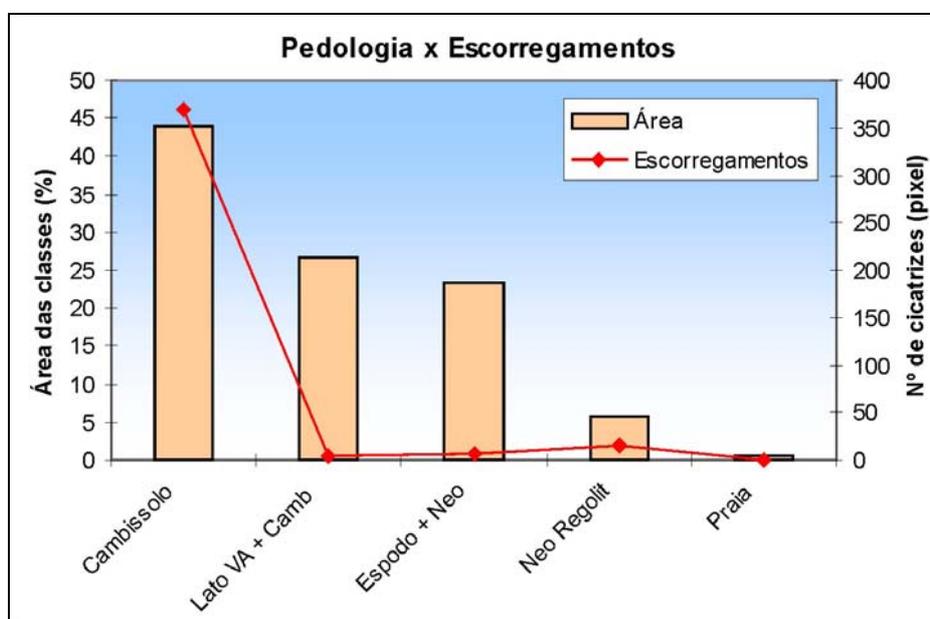


FIGURA 5.33 – Correlação entre classes de pedologia e frequência de escorregamentos.

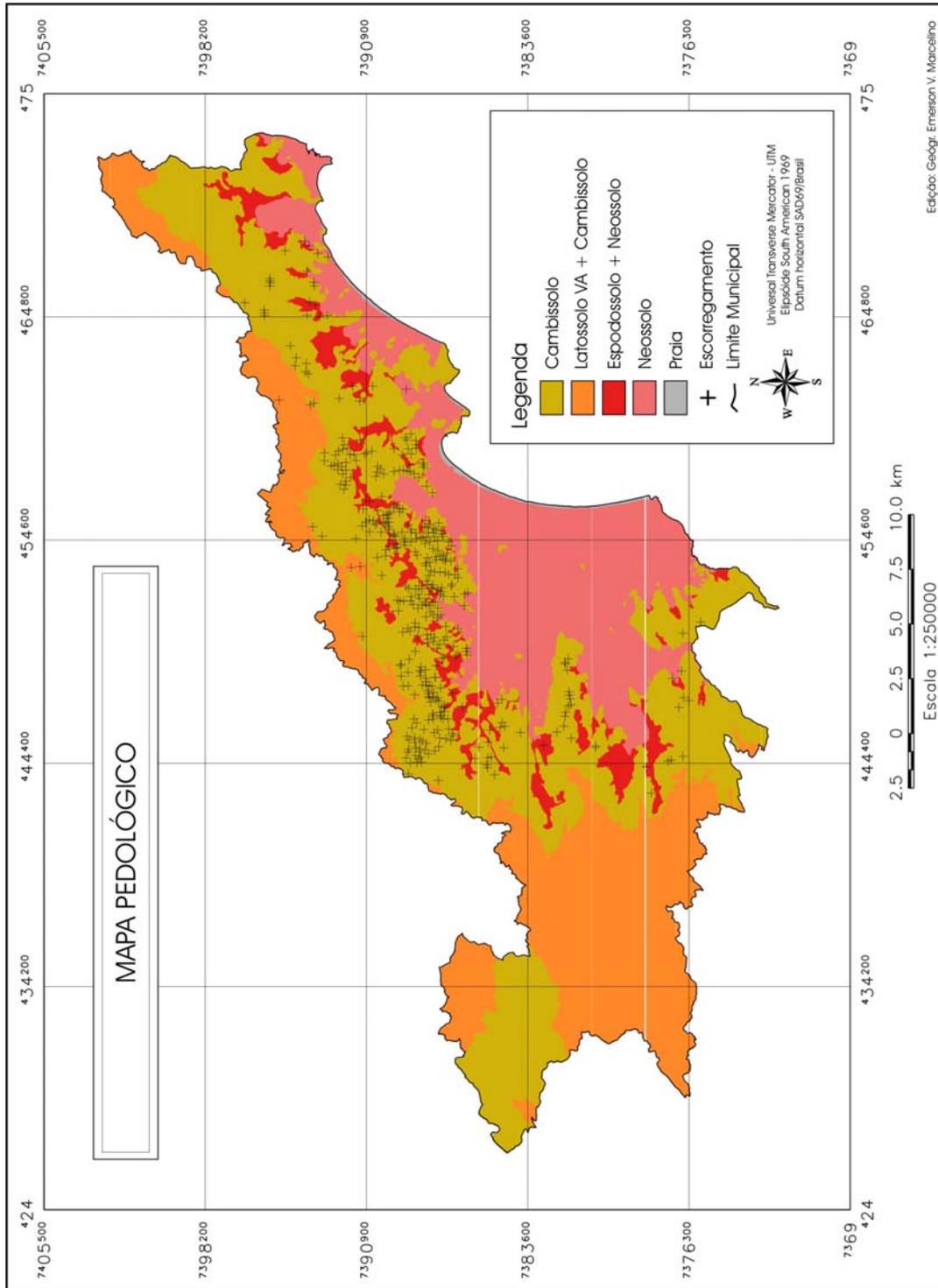


Figura 5.34 - Mapa pedológico.
 FONTE: adaptada de Crepani e Medeiros (2001).

5.4.8 Correlação entre Uso e Cobertura da Terra e Escorregamentos

De acordo com a Tabela 5.16, a maior ocorrência de escorregamentos, cerca de 198 casos (49,87%) foi assinalada para a classe Mata Atlântica. Em seguida, destaca-se a classe Desmatamento + Afloramento com 113 casos (28,46%) e a classe Mata Alterada com 46 escorregamentos, que representam 11,59% do total levantado.

TABELA 5.16 – Correlação entre classes de uso e cobertura da terra e frequência de escorregamentos.

Classes	Escorregamentos
Mata Atlântica	198 (49,87%)
Mata Alterada	46 (11,59%)
Pastagem	15 (3,78%)
Reflorestamento	0 (0%)
Desmatamento + Afloramento	113 (28,46%)
Vegetação Alterada	12 (3,02%)
Restinga	0 (0%)
Restinga Alterada	0 (0%)
Várzea	0 (0%)
Várzea Alterada	0 (0%)
Mangue Alterado	0 (0%)
Praia	0 (0%)
Ocupação humana	13 (3,27%)

Nas Figuras 5.35 e 5.36 é possível notar que o elevado índice de escorregamentos para a classe Mata Atlântica poder estar vinculado à grande área da mesma, que representa 69,49% da área do município. As classes que representam algum tipo de alteração antrópica, como Desmatamento + Afloramento, Mata Alterada, Pastagem, Vegetação Alterada e Ocupação Humana, somam juntas 199 escorregamentos (50,13%),

distribuídas em uma área que cobre somente 28% do município de Caraguatatuba. Ressalta-se que grande parte das áreas ocupadas está localizada na planície litorânea. Assim, conforme Caseti (1991), estes dados vêm confirmar a influência das atividades antrópicas na deflagração dos movimentos de massa, o que se dá normalmente através dos desmatamentos, pastagens e cortes de estradas.

Entretanto, Cruz (1974) apresenta uma hipótese sobre o papel da cobertura vegetal nos escorregamentos ocorridos em Caraguatatuba em março de 1967. A autora cita que a retirada da cobertura vegetal e a degradação da camada superficial favorecem uma impermeabilidade que acentua o escoamento superficial e diminui a possibilidade de ocorrência de deslizamentos. Zonas de pastos ou de capoeiras ralas resistiram aos escorregamentos, enquanto que nas áreas circunvizinhas recobertas pela floresta, a movimentação de massa foi intensa.

Cruz (1974) salienta que este fato pode ser explicado pelo peso e altura das árvores em vertentes de declive fortes e a movimentação dos horizontes superficiais do solo onde elas se fixam.

De Ploey e Cruz (1979), analisando a profundidade e a morfologia da matriz de raízes em uma encosta florestada no Morro do Tinga em Caraguatatuba, observaram que as raízes das gramíneas e ervas penetraram cerca de 20 cm no horizonte A, com algumas alcançando o topo do horizonte B. Este horizonte é perfurado por algumas raízes de arbustos e arvoretas, que chegaram a atingir uma profundidade de até 3 m. Somente as raízes das árvores ultrapassaram esta profundidade, alcançando uma profundidade máxima de 5 m. Os autores concluíram que a matriz de raízes é relativamente pouco espessa, fixando somente a parte superior do regolito.

Cunha e Guerra (1996) mencionam que escorregamentos rápidos são passíveis de ocorrer em vertentes muito íngremes e com solos pouco espessos e saturados, mesmo sob densa floresta, em virtude de elevados índices de precipitação.

Fiori e Borchardt (1997), confirmando tal hipótese, verificaram nas encostas da Serra do Mar no estado do Paraná, que em encostas íngremes o efeito da cobertura vegetal sobre os índices de segurança é insignificante.

Nas encostas da Serra do Mar, conceitualmente, a floresta reduz as taxas de perda de solo devido à interceptação da chuva pela copa das árvores e a atuação do sistema radicular que favorece o processo de infiltração e redução do escoamento superficial. Conseqüentemente, em associação a chuvas intensas e de longa duração, ocorre a rápida saturação do solo, gerando fluxos sub-superficiais nas zonas de contato entre o manto de intemperismo e a rocha sã, diminuindo a resistência ao cisalhamento. Neste processo, a atuação frenadora da matriz de raízes é insignificante devido à sua pouca espessura. Assim, o aumento da componente peso, devido à saturação do solo e ao peso da mata, faz com que toda a capa de material intemperizado se desprenda e deslize encosta abaixo.

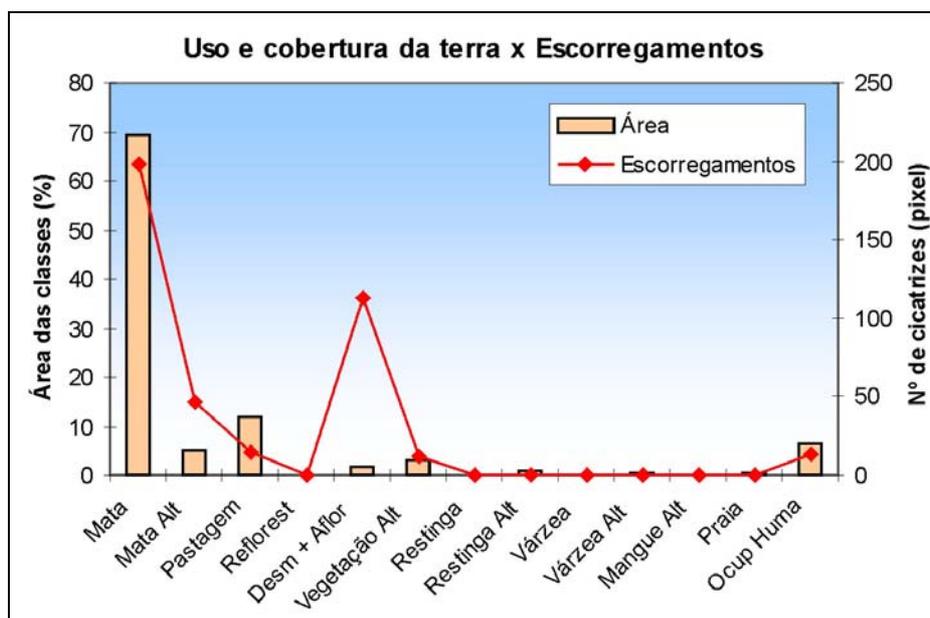


FIGURA 5.35 – Correlação entre classes de uso e cobertura da terra e freqüência de escorregamentos.

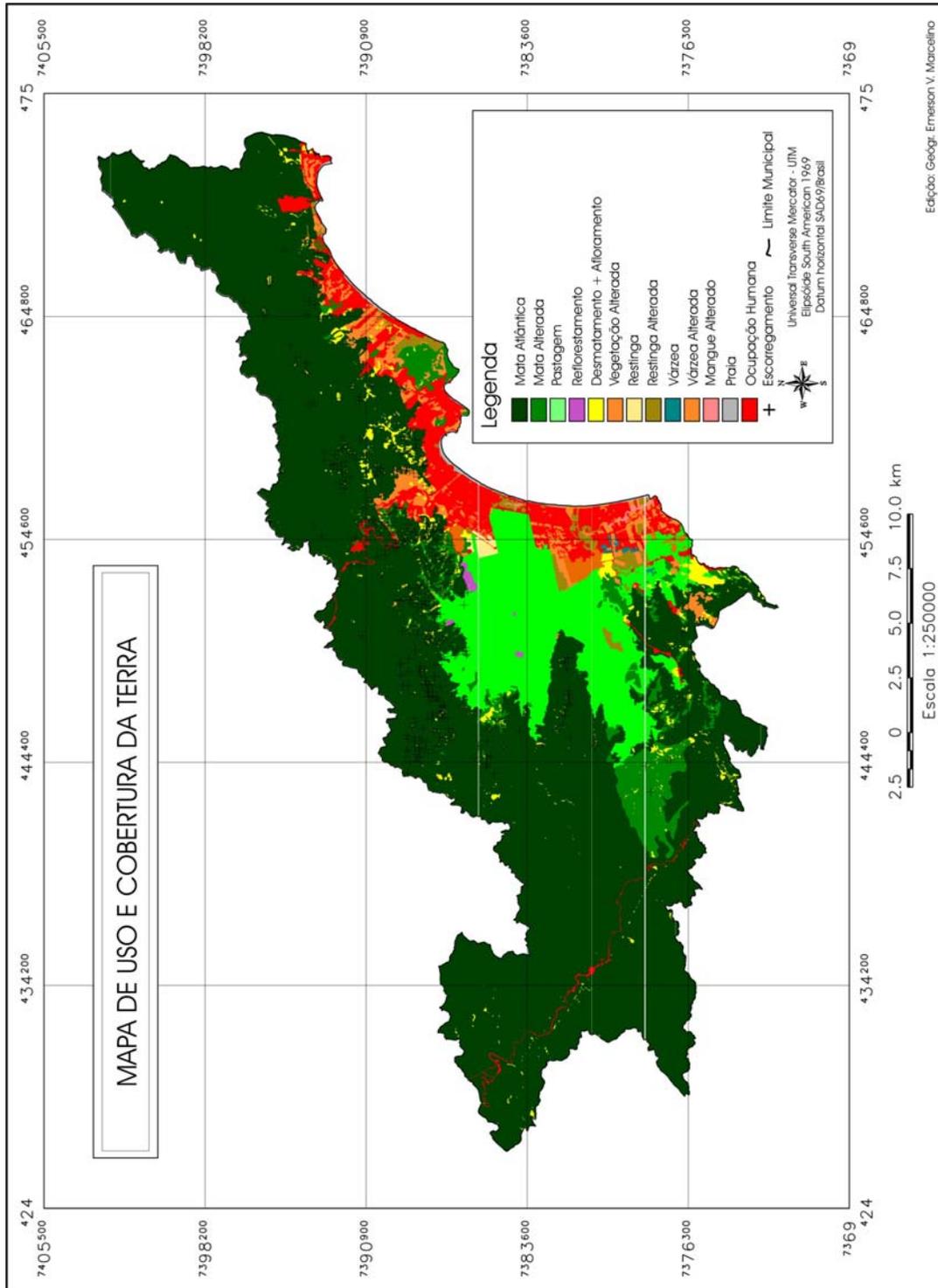


Figura 5.36 - Mapa de uso e cobertura da terra.
 FONTE: adaptada de Crepani e Medeiros (2001).

5.4.9 Síntese da Influência dos Parâmetros Geoambientais sobre a Ocorrência de Escorregamentos no Município de Caraguatatuba

Grande parte das cicatrizes de escorregamentos existentes nas encostas da Serra do Mar no município de Caraguatatuba/SP foi decorrente do evento catastrófico ocorrido em março de 1967. Este evento foi desencadeado por precipitações extremas ocorridas nos dias 17 e 18, quando os índices de precipitação foram de 260 e 420 mm, respectivamente (De Ploey e Cruz, 1979). Segundo Petri e Suguio (1971), citados por Cruz (1974), os escorregamentos movimentaram cerca de 2 milhões de toneladas de lama, rochas e detritos.

Guidicini e Nieble (1993) citam que os escorregamentos translacionais fazem parte da própria dinâmica da evolução das encostas. Os autores mencionam que, nas encostas da Serra do Mar, a maioria dos escorregamentos mobiliza o manto de intemperismo, que, em geral, é pouco espesso.

Na presente pesquisa, com relação às características geomorfológicas, verificou-se que os escorregamentos estão associados principalmente às médias encostas (50 – 500 m); a proximidade com a rede de drenagem, que caracteriza a presença de seções côncavas; e a declividade elevada ($25,2^\circ$ - 45°). Destaca-se também a direção predominante das encostas com maior incidência de cicatrizes. Estas encostas estão voltadas para os quadrantes E – S, que funcionam como uma barreira topográfica às passagens de sistemas frontais, ocasionando precipitações de caráter orográfico.

A formação litológica que mais apresentou cicatrizes de escorregamentos foi a composta por granitóides (gnaisse graníticos e rochas graníticas em decomposição). Entretanto, apesar da baixa correlação apresentada pela proximidade de lineamentos, a ocorrência de escorregamentos na área de estudo está fortemente controlada pelas estruturas geológicas. Isto deve-se ao fato de que as encostas estão posicionadas paralelamente a direção predominante das estruturas (NE-SW). Ressalta-se que a baixa correlação verificada entre escorregamentos e lineamentos, na presente pesquisa, deve-se ao número insuficiente de estruturas levantadas na área de estudo por Crepani e Medeiros (2001).

Dentre os tipos de solos avaliados, verificou-se uma predominância significativa de cicatrizes em Cambissolos. Supõe-se que esta elevada susceptibilidade esteja vinculada à profundidade do manto de intemperismo. Estes solos, principalmente os mais rasos, tendem a ser mais susceptíveis aos escorregamentos, devido à camada impermeável gerada pelo substrato rochoso, que favorece o encharcamento do solo e a presença de escoamento sub-superficial.

Com relação às formas de uso e cobertura da terra, ficou evidente que as atividades antrópicas contribuem significativamente para a deflagração de movimentos de massa. Apesar da grande quantidade de cicatrizes vinculadas às áreas com florestas, mais de 50% dos escorregamentos ocorreram em áreas antropizadas, que representam somente 28% da área total do município. Esta elevada incidência está associada aos desmatamentos e às áreas de pastagens. A proximidade com as estradas, apesar de ser um parâmetro altamente correlacionável, em função dos cortes realizados nas encostas, não apresentou um resultado expressivo. A baixa correlação deve-se à localização da área urbana na planície litorânea e ao número reduzido de estradas que avançam serra adentro. Concluindo, nas áreas coberta pela Mata Atlântica, as ocorrências de cicatrizes foram mais influenciada pela presença de solos rasos em encostas íngremes, do que pela presença da densa cobertura vegetal, devido à pouca ação frenadora da matriz de raízes.

5.5 Análise dos Métodos de Mapeamento de Áreas Susceptíveis a Escorregamentos

5.5.1 Método Booleano

Na Tabela 5.17, verifica-se que a classe Favorável obteve um acerto de 97%, contra os 3% da classe Não-favorável. Acredita-se que esta correlação deve-se principalmente ao tamanho da classe, visto que a mesma cobre cerca de 70% da área de estudo.

TABELA 5.17 – Resultado da avaliação do método booleano.

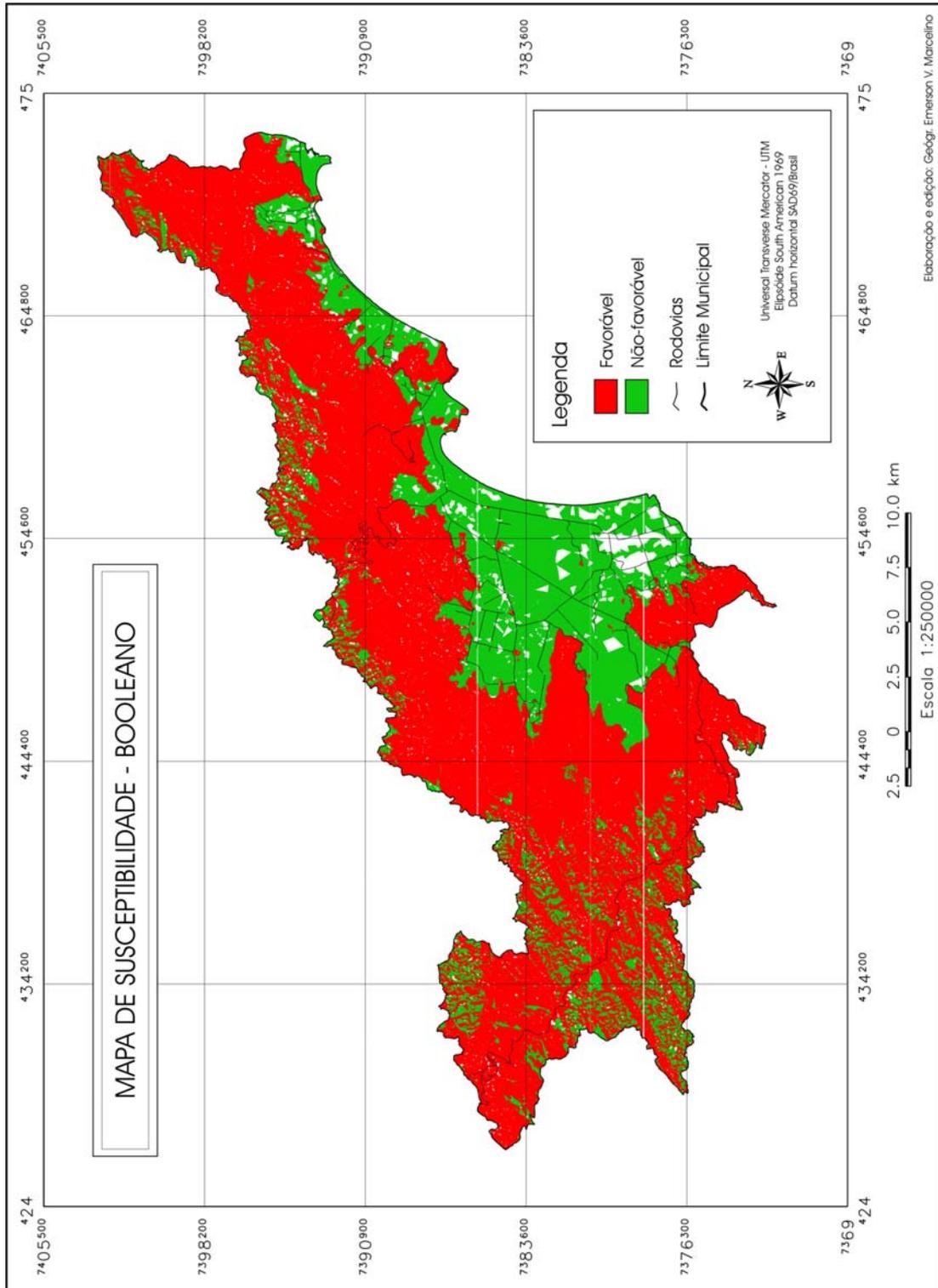
Classes	Área (%)	Escorregamentos
Favorável	70,47	97
Não-favorável	29,53	03

Conforme a Figura 5.37, grande parte da área do planalto foi classificada como favorável à ocorrência de escorregamentos. No entanto, como verificado no item 5.4, no planalto a probabilidade de ocorrência é mínima, devido ao relevo em morraria, às baixas declividades e às baixas amplitudes altimétricas. Esta generalização excessiva ocorreu em função de que foi atribuída a mesma importância dada às evidências, ou seja, o fator preponderante na definição das áreas favoráveis foi a presença de cicatrizes nas classes e não os parâmetros geoambientais. Outra grande desvantagem deste método foi a rigidez do produto final, que não permite uma hierarquização dos diversos níveis de susceptibilidade.

Dentre as vantagens do método Booleano verificadas na presente pesquisa, cita-se a boa demarcação das áreas não-favoráveis à ocorrência de escorregamentos na planície litorânea e a praticidade e simplicidade na execução do mapeamento.

Moreira (2001) cita que, comparando diversas técnicas de inferência para a predição de áreas com minerais radioativos no Planalto de Poços de Caldas (MG), o método booleano apresentou o segundo pior resultado dentre os métodos avaliados. O autor também menciona a generalização e a rigidez do produto final como desvantagens do método e a praticidade como vantagem.

É necessário destacar ainda a questão dos diversos polígonos sem informação na planície litorânea (Figura 5.37). Este problema originou-se na confecção do mapa de orientação de encostas, quando foi necessário o cruzamento deste PI com os demais. A ausência de dados, não permitiu a realização da álgebra de mapas no SPRING, deixando estes polígonos sem qualquer tipo de informação para todos os mapas de susceptibilidade. Entretanto, este problema não veio a comprometer a qualidade dos mapas finais, visto que os polígonos cobrem áreas planas onde a susceptibilidade de escorregamentos é nula.



Elaboração e edição: Geógr. Emerson V. Marcelino

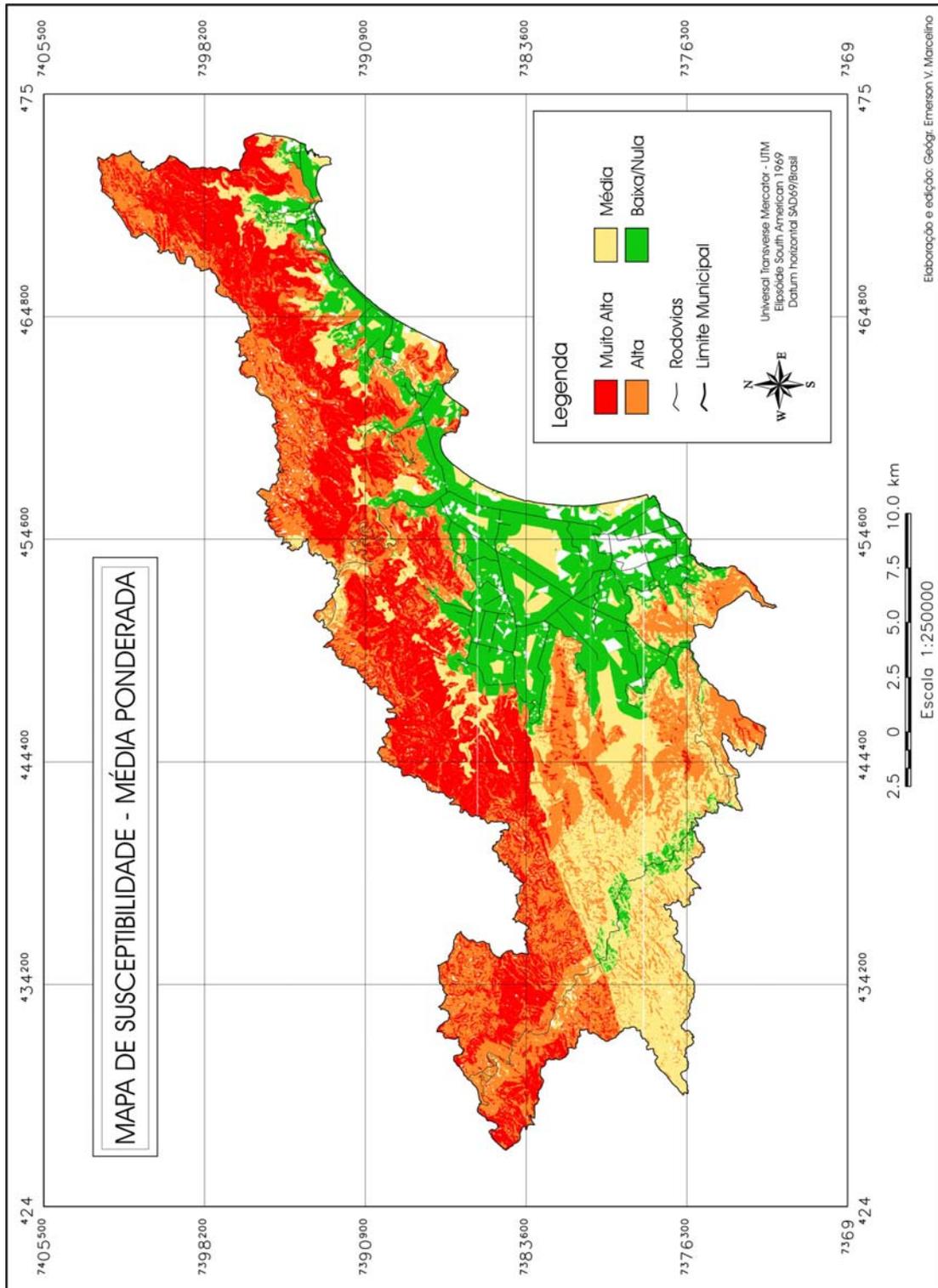
Figura 5.37 - Mapa de susceptibilidade a escorregamentos realizado pelo método Booleano.

5.5.2 Método Média Ponderada

Esta técnica, de acordo com a Tabela 5.18, apresentou uma boa correlação para a classe Muito Alta (62%), que cobre 27,21% da área de estudo. Na classe Alta a correlação de escorregamentos caiu para 30%, para uma área similar à da classe Muito Alta. Entretanto, apesar da baixa correlação (4%) da classe Baixa/Nula, esperava-se a ausência total de escorregamentos, visto que o relevo das áreas cobertas por esta classe é predominantemente plano (Figura 5.38).

TABELA 5.18 – Resultado da avaliação do método média ponderada.

Classes	Área (%)	Escorregamentos
Muito Alta	27,21	62
Alta	30,33	30
Média	22,67	04
Baixa/Nula	19,80	04



Elaboração e edição: Geógr. Emerson V. Marcelino

Figura 5.38 - Mapa de susceptibilidade a escorregamentos realizado pelo método Média Ponderada.

Na Figura 5.39, é possível notar que, no mapa final de susceptibilidade, diversas áreas na planície litorânea foram classificadas erroneamente. Ao invés de pertencerem à classe Baixa/Nula (cor verde), foram inseridas na classe Média (cor amarela). Nas áreas próximas às encostas também ocorreu o mesmo erro, ou seja, a classe Média adentrou equivocadamente na área de planície.

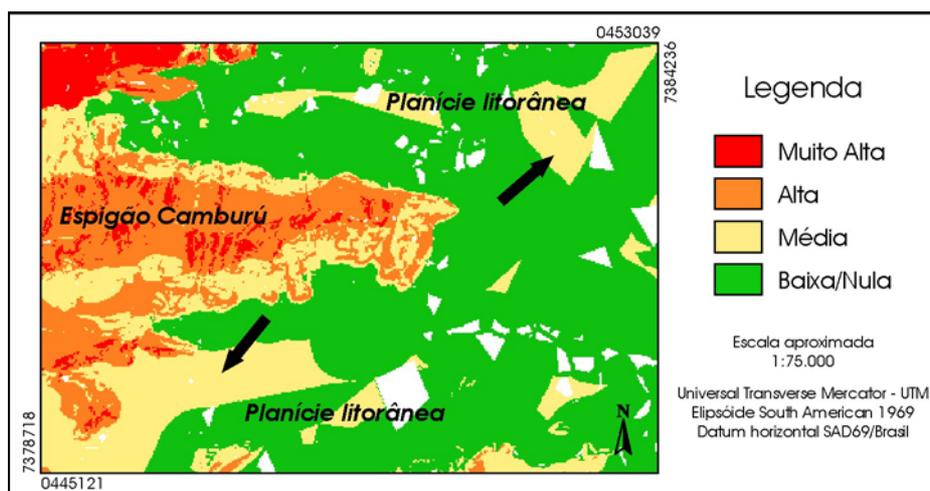


FIGURA 5.39 – Áreas classificadas erroneamente na planície litorânea.

Destaca-se também a grande quantidade de áreas classificadas como de susceptibilidade média e alta na bacia do rio Santo Antônio (Figura 5.40). Esta área é marcada pela proximidade com a Rodovia Tamoios, pela elevada declividade e densidade de drenagem, onde freqüentemente ocorrem escorregamentos generalizados. Desta forma, em virtude das condições geoambientais propícias à deflagração de movimentos de massa, acredita-se que esta área deveria ter sido inserida na classe Muito Alta.

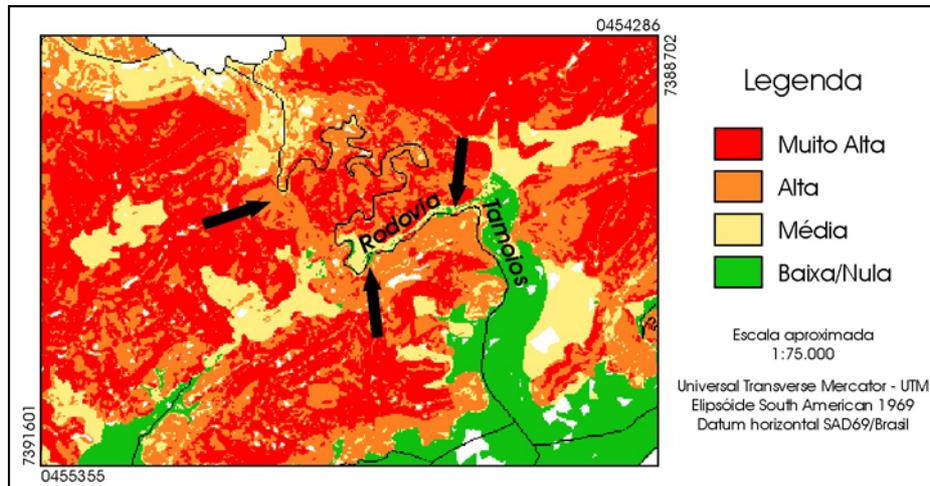


FIGURA 5.40 – Áreas classificadas erroneamente nas proximidades da Rodovia Tamoios.

Na área de planalto, localizado ao sul de Caraguatatuba, verificou-se também um contato abrupto entre a classe Média e a Alta (Figura 5.41), que coincide com o contato existente entre os litotipos granitóides e migmatitos. Este mesmo efeito também foi identificado ao longo da estrada que corta o planalto. Supõem-se que estes contatos abruptos foram gerados em função dos elevados pesos dados aos parâmetros geologia e distância de estradas.

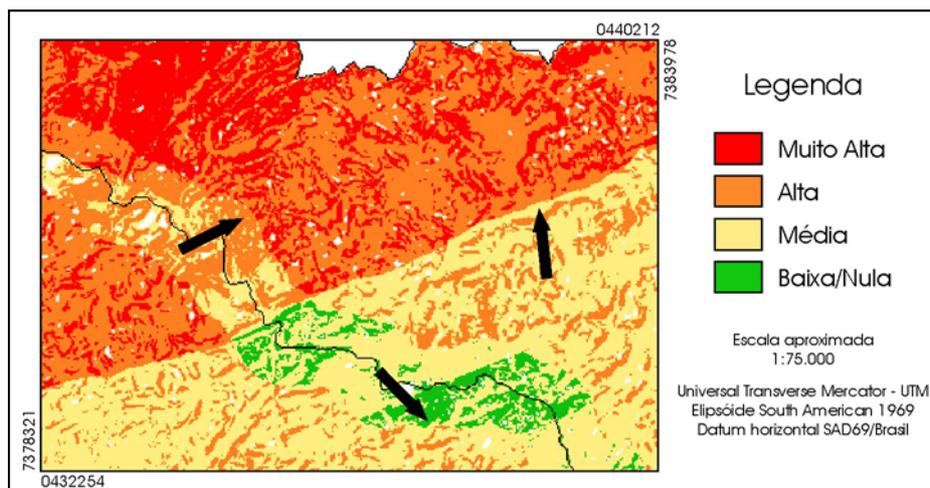


FIGURA 5.41 – Áreas classificadas erroneamente no planalto.

A grande vantagem deste método, conforme observado também por Bonham-Carter (1996) e Moreira (2001), é a maior flexibilidade na manipulação dos dados do que o

método Booleano. A ponderação das evidências, apesar da grande subjetividade, permite graduar relativamente as classes de susceptibilidade, o que favorece a priorização das medidas preventivas e o planejamento das situações de emergência (Ogura e Macedo, 2002).

5.5.3 Método AHP

De acordo com a Tabela 5.19, a classe que apresentou a maior correlação foi a Muito Alta, com 62% dos casos de escorregamentos, cobrindo 26,50% da área de estudo. Com relação a esta classe, a correlação foi idêntica ao do método Média Ponderada, com uma pequena diminuição na área da classe (Tabela 5.18).

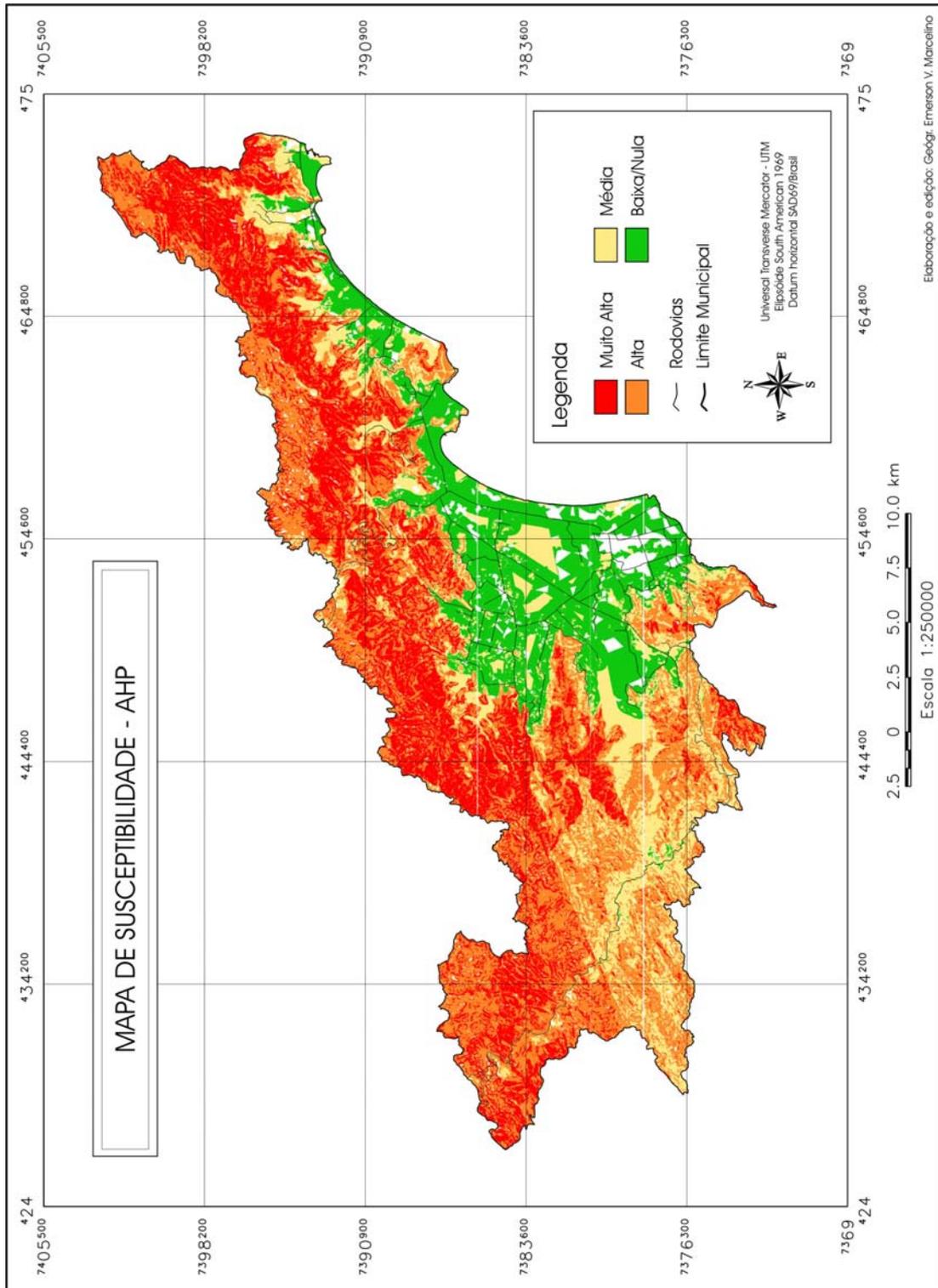
Na classe Alta susceptibilidade a diferença entre os métodos AHP e Média Ponderada, também foi insignificante. Com relação à área da classe, o método AHP apresentou um acréscimo de 6,65%, e de escorregamentos uma diminuição de 3% em relação a Média Ponderada. Para as classes Média e Baixa/Nula ocorreu uma diminuição de 3,70% e 2,16%, respectivamente, em relação às áreas das mesmas classes do método Média Ponderada (Tabelas 5.18 e 5.19).

TABELA 5.19 – Resultado da avaliação do método AHP.

Classes	Área (%)	Escorregamentos
Muito Alta	26,50	62
Alta	36,89	27
Média	18,97	08
Baixa/Nula	17,64	03

Na Figura 5.42, é possível verificar que os erros identificados para as classes do método Média Ponderada também assemelham-se aos identificados para o método AHP. As zonas abruptas de contatos entre as classes de susceptibilidade na área de planalto, relativamente suavizadas, também podem ser visualizadas. Na planície também existem diversas áreas classificadas como susceptibilidade Média ao invés de Baixa/Nula. Já nas

proximidades da Rodovia Tamoios, muitas áreas continuam sendo classificadas como média e alta susceptibilidade. Entretanto, destaca-se o aumento das áreas com susceptibilidade Muito Alta no Espigão do Camburú, visto que estas áreas apresentam elevada declividade, conforme demonstrado no item 5.4.2, sendo altamente susceptíveis à ocorrência de escorregamentos.



Elaboração e edição: Geógr. Emerson V. Marcelino

Figura 5.42 - Mapa de susceptibilidade a escorregamentos realizado pelo método AHP.

5.5.4 Método Probabilidade Condicional

A ponderação das classes e dos parâmetros geoambientais (evidências) neste método foi realizada através do cálculo do Contraste (C_w). Este índice maximiza a correlação entre as evidências e as ocorrências de escorregamentos, por levar em consideração a área de cada classe no cálculo da razão de suficiência (LS) e da razão de necessidade (LN). O fatiamento das classes foi realizado de forma semelhante ao Média Ponderada e ao AHP, isto é, aplicou-se a técnica do Desvio Quartílico. Desta forma, todo o processo de ponderação e fatiamento baseou-se em critérios estatísticos, diminuindo a possibilidade de inserção de subjetividade no processo.

Nota-se, na Tabela 5.20, a elevada correlação apresentada pela classe Muito Alta (95%), superando significativamente os métodos Média Ponderada e AHP. Entretanto, esta classe também aumentou de tamanho, ocupando uma área de 37,84% da área de estudo. Em relação aos demais métodos avaliados, este aumento foi consequência da diminuição das áreas de alta susceptibilidade, ou seja, parte da área da classe Alta foi reclassificada como Muito Alta no método Probabilidade Condicional. Apesar de não ser um fator preponderante, este aumento da área da classe também influenciou no elevado índice de correlação para a mesma. Outro fato que merece atenção foi a diminuição significativa de escorregamentos nas demais classes, principalmente para a classe Alta (Tabela 5.20).

TABELA 5.20 – Resultado da avaliação do método Probabilidade Condicional.

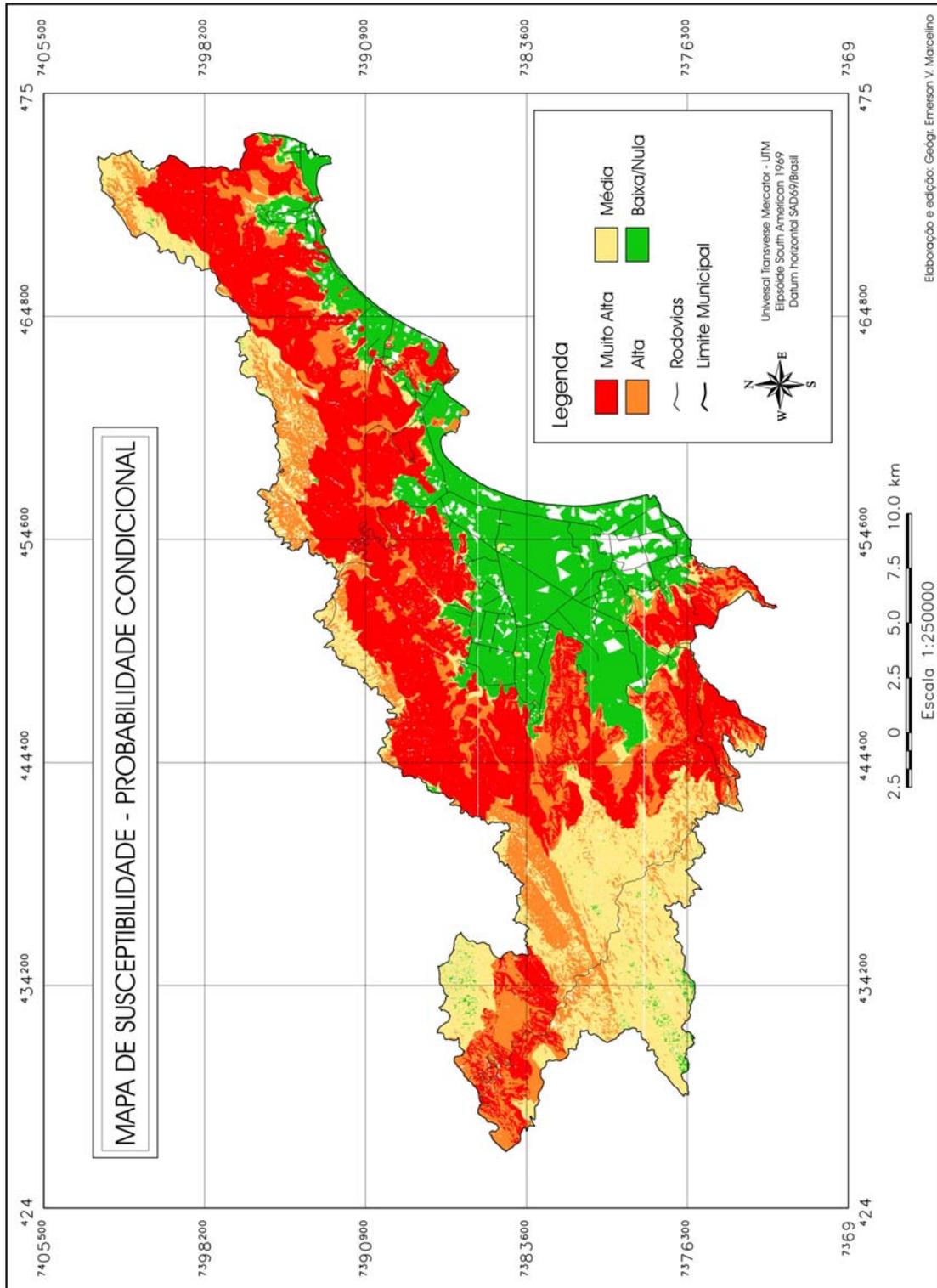
Classes	Área (%)	Escorregamentos
Muito Alta	37,84	95
Alta	19,76	04
Média	21,31	01
Baixa/Nula	21,09	0

Na Figura 5.43, destaca-se a presença significativa da classe Muito Alta nas áreas compostas pela encostas íngremes da Serra do Mar. Isto vem comprovar a eficiência do

método na discriminação de áreas com elevada probabilidade de ocorrência de escorregamentos. Na planície litorânea não foram verificados erros de classificação e no planalto a classe de susceptibilidade média predominou sobre as demais.

Moreira (2001) ressalta que esta abordagem estatística de definição dos ponderadores é altamente indicada em situações onde torna-se difícil hierarquizar as evidências. Além disso, como verificado na presente pesquisa, este método permite correlacionar mais precisamente as evidências com as verdades de campo.

Entretanto, de acordo com Moreira (2001), a grande desvantagem deste método é a necessidade da existência de verdades de campo para a realização da tabulação cruzada com as evidências e conseqüente definição dos pesos das evidências e das suas respectivas classes, fato que pode comprometer a realização de um mapeamento em localidades que não possuem um bom inventário de escorregamentos. Estas observações vão ao encontro dos comentários realizados por Carrara et al (1995), Westen et al. (1997) e Dai e Lee (2002), onde os autores citam que a precisão e a confiabilidade do método depende da quantidade e da qualidade dos dados e da definição correta das evidências.



Elaboração e edição: Geógr. Emerson V. Marcelino

Figura 5.43 - Mapa de susceptibilidade a escorregamentos realizado pelo método Probabilidade Condicional.

5.5.5 Análise Comparativa dos Métodos de Mapeamento de Áreas Susceptíveis a Escorregamentos

Dentre os métodos avaliados, o método Booleano foi o que apresentou os piores resultados (Figura 5.44), em virtude da excessiva generalização da classe Favorável e da rigidez do mapa final, que não permitiu a hierarquização dos níveis de susceptibilidade a escorregamentos.

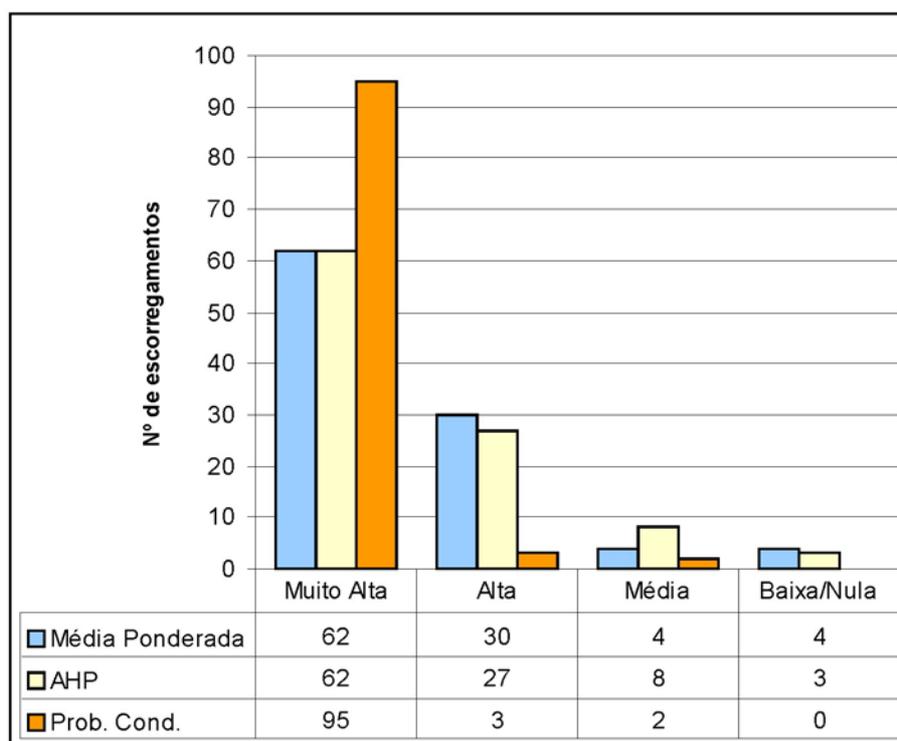


FIGURA 5.44 – Comparação entre os métodos Média Ponderada, AHP e Probabilidade Condicional com relação à frequência de escorregamentos.

De acordo com a Figura 5.44, verificou-se grande semelhança nos resultados dos métodos Média Ponderada e AHP, principalmente para a classe Muito Alta, que apresentou uma correlação 62% para ambos os métodos. Entretanto, os resultados apresentados pela Média Ponderada e pela AHP não foram melhores por não levarem em consideração, de forma quantitativa, a relação existente entre as cicatrizes de escorregamentos e a área das classes das variáveis geoambientais que serviu de base para a ponderação das evidências. Ao contrário destes métodos, a Probabilidade Condicional que considera a área das classes no processo de ponderação, apresentou-se

como o método mais adequado para o mapeamento de áreas susceptíveis a escorregamentos. Tanto que apresentou uma correlação de 95% para a classe Muito Alta, demonstrando uma superioridade significativa em relação aos demais métodos. Além disso, grande parte desta classe cobriu as encostas declivosas da Serra do Mar, fato que veio corroborar para o destaque dado a este método. Com relação às áreas das classes, o comportamento também foi relativamente similar para todos os métodos, com exceção das classes Muito Alta e Alta da Probabilidade Condicional (Figura 5.45).

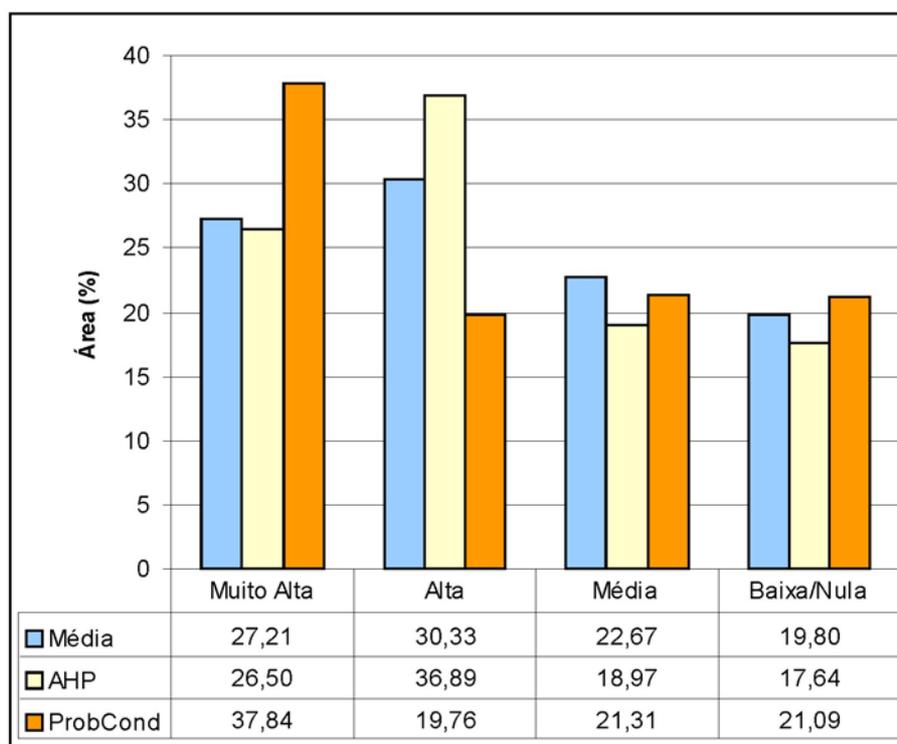


FIGURA 5.45 – Correlação entre os métodos Média Ponderada, AHP e Probabilidade Condicional com relação à área das classes de susceptibilidade.

Entretanto, analisando a correlação espacial entre as classes dos mapas de susceptibilidade, pode-se notar que as diferenças entre os métodos aumentou consideravelmente. Nota-se, na Tabela 5.21, que, apesar da correlação espacial entre os métodos Média Ponderada e AHP ter sido relativamente boa (78%), com exceção da classe Baixa/Nula, todas as demais apresentaram grande confusão, principalmente nas áreas de planalto, cobertas pelas classes Alta e média. Esta diferença foi ainda maior quando comparados os métodos AHP e Probabilidade Condicional. Na Tabela 5.22,

nota-se que a correlação entre estes mapas foi baixa (54%), e a classe que apresentou uma maior correlação foi a Baixa/Nula, atingindo 77% da área da classe classificada corretamente. O pior resultado foi obtido para a classe Média, onde a correlação entre os dois mapas foi praticamente 32%. Estes resultados contrariam as observações realizadas por Fernandes e Amaral (1996) e Sestini (2000), onde os autores comentam que mapeamentos para a definição de áreas de risco elaborados por metodologias diferentes apresentam resultados semelhantes.

TABELA 5.21 – Correlação entre a distribuição espacial das classes de susceptibilidade do mapa Média Ponderada em relação ao mapa AHP.

Classes	CC (%)	Exatidão Global
Muito Alta	87,62	0,78
Alta	70,07	
Média	78,34	
Baixa/Nula	100,00	

TABELA 5.22 – Correlação entre a distribuição espacial das classes de susceptibilidade do mapa AHP em relação ao mapa Probabilidade Condicional.

Classes	CC (%)	Exatidão Global
Muito Alta	54,44	0,54
Alta	50,66	
Média	31,88	
Baixa/Nula	77,33	

CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES

Na avaliação cartográfica do banco de dados da presente pesquisa, de acordo com os critérios do PEC, verificou-se que a escala de mapeamento mais apropriada foi a 1:100.000, em função do elevado erro cartográfico (RMSE = 43,12 m). Salienta-se que as diferenças entre as medidas reais e as observadas comportaram-se de forma aleatória, devido à inadequada distribuição dos pontos de controle utilizados para georreferenciar a base topográfica e as imagens de satélite.

Para a elaboração do mapa de inventário, foram avaliados seis métodos de fusão (Brovey, HSV, PCA, IHS, WTVE e WTYO), com o intuito de identificar o mais adequado para a identificação das cicatrizes de escorregamentos. Em termos de qualidade espacial, conclui-se que o método WTVE apresentou os melhores resultados, comprovados pelos altos índices de correlação obtidos tanto para a fusão HRV/ETM quanto para a fusão ETM/ETM. Com exceção da banda 4 no primeiro caso, todas as demais bandas avaliadas apresentaram correlações acima de 90%. Na avaliação espectral, apesar da boa qualidade das imagens híbridas WT, os melhores resultados foram obtidos com a fusão IHS para as imagens HRV/ETM. Este método perdeu somente para o método WTVE na variância e desvio padrão da banda 4. Para o caso ETM/ETM, as imagens híbridas obtidas pelos métodos WTVE e WTYO foram as que apresentaram os melhores resultados estatísticos para todas as bandas avaliadas. Apesar da pequena diferença no D_{ho} existente entre estes métodos, o WTVE prevaleceu sobre os demais; conseqüentemente, foi o método que forneceu imagens híbridas espectralmente mais similares às originais. Na avaliação visual dos seis métodos de fusão para o caso HRV/ETM, o método IHS apresentou a melhor média final (0,43), com base nas notas normalizadas da integridade espacial (0,76), espectral (0,09) e potencial fotointerpretativo (0,43). Para os especialistas, além de uma alta similaridade de detalhes e boa correlação espectral, este método também mostrou excelente aplicabilidade para a discriminação dos diversos alvos presentes na cena. Desta forma,

com base nas avaliações realizadas, concluiu-se que a fusão IHS, das imagens 453 ETM e PAN HRV, foi a que melhor preservou as informações espaciais e espectrais das imagens originais, conseqüentemente, possibilitando uma melhor discriminação das cicatrizes de escorregamentos para a elaboração do mapa de inventário.

O inventário de escorregamentos foi realizado através da classificação das imagens IHS utilizando o classificador MAXVER e interpretação visual. As amostras selecionadas para a classificação apresentaram um índice Kappa de 95,42%. As classes que apresentaram os menores erros de classificação foram a Mata e a Água. Entretanto, as que apresentaram maior confusão foram as classes Pastagem e Escorregamento. Isto deve-se ao comportamento espectral similar dos alvos, pois verificou-se que grande parte das cicatrizes estão cobertas por gramíneas e samambaias-das-taperas. Assim, através da análise simultânea da imagem classificada MAXVER e análise visual foi possível identificar 497 escorregamentos, sendo que as áreas mais atingidas foram as bacias dos rios Guaxinduba, Santo Antônio e Juqueriquerê.

Analisando a distribuição espacial dos escorregamentos na área de estudo, verificou-se que as áreas de maior ocorrência estão associadas às médias encostas (50 – 500 m), com formato convexo-côncavo, e a declividade elevada (25,2° - 45°). Grande parte destas encostas estão voltadas para os quadrantes E – S, que servem de barreira topográfica ocasionando precipitações orográficas, devido principalmente à passagem de sistemas frontais.

Os granitóides são os litotipos predominantes nestas áreas. Apesar da baixa correlação apresentada pela proximidade de lineamentos, a ocorrência de escorregamentos também está fortemente controlada pelas estruturas geológicas, com direção NE-SW. Esta baixa correlação deve-se ao número insuficiente de estruturas levantadas na área de estudo por Crepani e Medeiros (2001).

Dentre os tipos de solos avaliados, verificou-se uma predominância significativa de cicatrizes em Cambissolos. Estes solos, principalmente os mais rasos, tendem a ser mais susceptíveis aos escorregamentos, devido à camada impermeável gerada pelo substrato

rochoso, que favorece o encharcamento do solo e a presença de escoamento sub-superficial.

Com relação às formas de uso e cobertura da terra, ficou evidente que as atividades antrópicas contribuem significativamente para a deflagração de movimentos de massa. Apesar da grande quantidade de cicatrizes vinculadas às áreas com florestas, mais de 50% dos escorregamentos ocorreram em áreas antropizadas, que representam somente 28% da área total do município. A proximidade com as estradas não apresentou uma correlação expressiva, devido à localização da área urbana na planície litorânea e ao número reduzido de estradas que avançam na Serra do Mar. Nas áreas cobertas pela Mata Atlântica, apesar da sua função protetora, as ocorrências de cicatrizes foram deflagradas pela presença de solos rasos em encostas íngremes.

A partir da definição dos pesos dos parâmetros geoambientais e suas respectivas classes foram aplicadas diversas técnicas de inferência geográfica com o intuito de selecionar o método que melhor discriminasse as áreas susceptíveis à ocorrência de escorregamentos. Dentre os métodos avaliados, o método Booleano foi o que apresentou os piores resultados em virtude da excessiva generalização das áreas favoráveis à ocorrência de escorregamentos e da rigidez do mapa final. Na avaliação dos métodos Média Ponderada e AHP, verificou-se grande semelhança nos resultados, principalmente para a classe Muito Alta, apresentando uma correlação de 62% para ambos os métodos. Entretanto, estes métodos apresentaram grande confusão na classificação das áreas do planalto. Outra grande desvantagem, foi a subjetividade presente na determinação dos pesos das evidências, que não levaram em consideração a relação existente entre a ocorrência de escorregamentos e a área das classes das variáveis geoambientais. O método Probabilidade Condicional foi o que apresentou o melhor resultado, com destaque para a correlação de 95% verificada para a classe Muito Alta, que cobre as encostas íngremes da Serra do Mar. Além disso, este método apresenta como vantagens a ponderação das classes e evidências baseadas em critérios quantitativos e a hierarquização do mapa final, que favorece a priorização das medidas preventivas e o planejamento das situações de emergência. Como desvantagem do

método, cita-se a necessidade da existência de uma boa quantidade e qualidade de dados de campo.

A qualidade dos mapeamentos, com base nos resultados apresentados nesta pesquisa, está intimamente relacionada com a precisão geométrica, o nível de detalhamento dos mapas temáticos e a determinação da importância relativa das variáveis. Para o primeiro ponto, sugere-se a utilização de bases cartográficas confiáveis e de dados de GPS coletados em campo para a construção do banco de dados geográficos. No segundo ponto, sugere-se que todos os mapas temáticos possuam uma mesma escala de detalhamento, evitando generalizações excessivas que possam comprometer a ponderação das evidências. E, com relação ao último ponto, sugere-se o uso de métodos matemáticos e estatísticos na definição dos pesos das evidências e suas respectivas classes.

As técnicas de sensoriamento remoto e SIG provaram ser altamente indicadas para a elaboração de mapas de susceptibilidade a escorregamentos cada vez mais precisos, em virtude da diminuição da subjetividade na elaboração dos mapas de inventário e na determinação da importância relativa das evidências. Nesta pesquisa, ficou provado que, utilizando a técnica de fusão IHS e a técnica de inferência geográfica Probabilidade Condicional, é possível realizar um mapeamento quantitativo para áreas propensas à ocorrência de escorregamentos. Entretanto, recomenda-se que estas técnicas sejam avaliadas em outras regiões do território brasileiro, que apresentem características geoambientais distintas. Além disso, sugere-se a elaboração de inventários de escorregamentos, com a participação dos governos municipais e estaduais, nas áreas onde o fenômeno é mais frequente, com o intuito de melhor compreender e modelar tais processos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ahmad, R.; McCalpin, J. Landslide susceptibility maps for the Kingston Metropolitan area, Jamaica with notes on their use. **UDS Publication**, n. 5, 1999, 25 p.
- Albuquerque, P. C. G.; Santos, C. C. GPS para iniciantes. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento, 11., Belo Horizonte, 2003. **Anais...** Belo Horizonte: INPE, 2003. 29p.
- Alcántara-Ayala, I. Geomorphology, natural hazards, vulnerability and prevention of natural disasters in developing countries. **Geomorphology**, v. 47, n. 2-4, p. 107–124, Out. 2002.
- Alexander, D. E. A survey of the field of natural hazards and disaster studies. In: Carrara, A.; Guzzetti, F. (Ed.) **Geographical information systems in assessing natural hazards**. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1995. Cap. 1, p. 1-19.
- Anbalagan, R.; Singh, B. Landslide hazard and risk assessment mapping of mountainous terrains - a case study from Kumaun Himalaya, India. **Engineering Geology**, v. 43, n. 4, p. 237-246, Set. 1996.
- Ardizzone, F.; Cardinali, M.; Carrara, A.; Guzzetti, F.; Reichenbach, P. Impact of mapping errors on the reliability of landslide hazard maps. **Natural Hazards and Earth System Sciences**, v. 2, n. 1-2, p. 3-14, 2002.
- Atkinson, P. M.; Massari, R. Generalised linear modelling of susceptibility to landsliding in the Central Apennines, Italy. **Computers & Geosciences**, v. 24, n. 4, p. 373-385, 1998.
- Augusto Filho, O. **Cartas de risco de escorregamentos: uma proposta metodológica e sua aplicação no município de Ilhabela, SP**. São Paulo. 162p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Escola Politécnica - Universidade de São Paulo, 1994.
- Augusto Filho, O.; Wolle, C. M. Cartas de risco de escorregamentos: uma proposta metodológica e sua aplicação no município de Ilhabela, SP. **Solos e Rochas**, v. 19, n. 1, p. 45-62, Abr. 1996.
- Banon, G. J. F. Simulação de imagens de baixa resolução. **SBA: Controle e Automação**, v. 2, n. 3, p. 180-192, 1990.
- Banon, G. J. F.; Fonseca, L. M. G. **CBERS simulation from Spot and its restoration**. Disponível em: <<http://hermes.dpi.inpe.br:1905/col/dpi.inpe.br/banon/1998/05.18.09.47/doc/target.html>>. Acesso em: 18 mar. 2001.
- Barredo, J. I.; Benavides, A.; Hervás, J.; Westen, C. J. Comparing heuristic landslide hazard assessment techniques using GIS in the Tirajana basin, Gran Canaria Island, Spain. **JAG: International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 2, n. 1, p. 9-23, 2000.
- Bigarella, J. J.; Becker, R. D.; Passos, E. **Estrutura e origem das paisagens tropicais e subtropicais**. Florianópolis: Editora da UFSC, 1996. 875 p.
- Bigarella, J. J.; Bigarella, I. E. K.; Jost, H. Catastrophic events in the Tubarão area. **Boletim Paranaense de Geociências**, n. 33, p. 200-206, 1975.

- Bonham-Carter, G. F. **Geographic information systems for geoscientists: modelling with GIS**. Ottawa: Pergamon, 1996. 398 p.
- Bowker, D. E.; Davis, R. E.; Myrick, D. L.; Stacy, K.; Jones, W. T. **Spectral reflectances of natural targets for use in remote sensing studies**. Washington: NASA, 1985. 181 p. (NASA RP. 1139).
- Brasil. Ministério da Ciência e Tecnologia. Comissão de Cartografia. **Cartografia e Aerolevanteamento: legislação**. Brasília: MCT, 1986.
- Brunsdon, D. Mass movement; the research frontier and beyond: a geomorphological approach. **Geomorphology**, v. 7, p. 85-128, 1993.
- Buiten, H. J.; Putten, B. Quality assessment of remote sensing image registration – analysis and testing of control point residuals. **Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 52, p. 57-73, 1997.
- Burrough, P. A.; McDonnell, R. A. **Principles of geographical information systems**. Oxford: Oxford University Press, 1998. 333 p.
- Câmara, G.; Medeiros, J. S. Princípios básicos em geoprocessamento. In: Assad, E. D.; Sano, E. E. (Ed.) **Sistema de informações geográficas: aplicações na agricultura**. Brasília: Embrapa, 1998. p. 03-11.
- Câmara, G.; Monteiro, A. M. V. Conceitos básicos da ciência da geoinformação. In: Câmara, G.; Davis, C., Monteiro, A. M. V. (Ed.) **Introdução à ciência da geoinformação**. Disponível em: <<http://www.dpi.inpe.br/gilberto/livro/introd/index.html>> Acesso em: 23 nov. 2001.
- Câmara, G.; Moreira, F. R.; Barbosa, C.; Almeida Filho, R.; Bönisch, S. Técnicas de inferência geográfica. In: Câmara, G.; Davis, C., Monteiro, A. M. V. (Ed.) **Introdução à ciência da geoinformação**. Disponível em: <<http://www.dpi.inpe.br/gilberto/livro/introd/cap9-inferencia.pdf>>. Acesso em: 23 nov. 2001.
- Carper, W. J.; Lillesand, T. M.; Kiefer, R. W. The use of Intensity-Hue-Saturation transformations for merging Spot panchromatic and multispectral image data. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v. 56, n. 4, p. 459-467, Abr. 1990.
- Carrara, A.; Cardinali, M.; Guzzetti, F. Uncertainty in assessing landslide hazard and risk. **ITC-Journal**, v. 2, p. 172-183, 1992.
- Carrara, A.; Cardinali, M.; Guzzetti, F.; Reichenbach, P. GIS technology in mapping landslide hazard. In: Carrara, A.; Guzzetti, F. (Ed.) **Geographical information systems in assessing natural hazards**. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1995. Cap. 8, p. 135-175.
- Carrara, A.; Guzzetti, F.; Cardinali, M.; Reichenbach, P. Use of GIS technology in the prediction and monitoring of landslide hazard. **Natural Hazards**, v. 20, n. 2, p. 117-135, Nov. 1999.
- Carson, M. A.; Kirkby, M. J. **Hillslope form and process**. London: Cambridge University Press, 1975. 475 p.

- Carter, D. B. **Analysis of multiresolution data fusion techniques**. Blacksburg, USA. 54 p. Thesis (Master of Science in Geography) - Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University, 1998.
- Cassetti, V. **Ambiente e apropriação do relevo**. São Paulo: Contexto, 1991. 136 p.
- Castro, S. D. A. Riesgos y peligros: una visión desde la geografía. **Scripta Nova**, v. 4, n. 60, p. 16, Mar. 2000. Disponível em: <<http://www.ub.es/geocrit/sn-60.htm>>. Acesso em: 10 maio 2001.
- Chang, J.; Slaymaker, O. Frequency and spatial distribution of landslides in a mountainous drainage basin: Western Foothills, Taiwan. **Catena**, v. 46, n. 4, p. 285-307, Fev. 2002.
- Chavez, P. S.; Sides, S. C.; Anderson, J. A. Comparison of three different methods to merge multiresolution and multispectral data: Landsat TM and Spot Panchromatic. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 57, n. 3, p. 295-303, 1991.
- Christofolletti, A. **Geomorfologia**. São Paulo: Edgard Blucher, 1980. 188 p.
- Chung, C. F.; Fabbri, A. G.; Westen, C. J. Multivariate regression analysis for landslide hazard zonation. In: Carrara, A.; Guzzetti, F. (Ed.) **Geographical information systems in assessing natural hazards**. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1995. Cap. 7, p. 107-134.
- Clerici, A.; Perego, S.; Tellini, C.; Vescovi, P. A procedure for landslide susceptibility zonation by the conditional analysis method. **Geomorphology**, v. 48, n. 4, p. 349-364, Dez. 2002.
- Coelho Neto, A. L. Hidrologia de encosta na interface com a geomorfologia. In: Guerra, J.T.; Cunha, S.B. **Geomorfologia: uma atualização de bases e conceitos**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1995. p. 93-148.
- Colangelo, A. C.; Cruz, O. Índice de magnitude-freqüência espacial de movimentos de massa num tropical úmido. **GEOUSP**, n. 8, p. 17-27, 1997.
- Congalton, R.; Green, K. **Assessing the accuracy of remotely sensed data: principles and practices**. Boca Raton: CRC/Lewis Press, 1999. 137 p.
- Conti, J. B. **Circulação secundária e efeito orográfico na gênese das chuvas na região leste-nordeste paulista**. São Paulo. 82 p. (Série teses e monografias, n.18). Tese (Doutorado em Geografia) – Instituto de Geografia – Universidade de São Paulo, 1975.
- Coppock, J. T. GIS and natural hazards: an overview from a GIS perspective. In: Carrara, A.; Guzzetti, F. **Geographical information systems in assessing natural hazards**. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1995. Cap. 2, p. 21-34.
- Coussot, P.; Meunier, M. Recognition, classification and mechanical description of debris flows. **Earth-Science Reviews**, v. 40, n. 3-4, p. 209-227, Jun. 1996.
- Crepani, E.; Medeiros, J. S. Sensoriamento remoto e geoprocessamento aplicados ao estudo de movimentos de massa no município de Caraguatatuba-SP. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 10., Foz do Iguaçu, 2001. **Anais...** Foz do Iguaçu: INPE, 2001. p. 931-933.

Cristo, S. S. V. **Análise de susceptibilidade a riscos naturais relacionados às enchentes e deslizamentos do setor leste da bacia hidrográfica do rio Itacorubi, Florianópolis - SC.** Florianópolis. 121p. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Universidade Federal de Santa Catarina, 2002.

Crozier, M. J. **Landslides: causes, consequences & environment.** Dover: Croom Helm, 1986. 252 p.

Cruden, D. M. A simple definition of a landslide. **Bulletin International Association for Engineering Geology**, v. 43, p. 27-29, 1991.

Cruz, O. **A Serra do Mar e o litoral na área de Caraguatatuba: contribuição à geomorfologia litorânea.** São Paulo. 181p. (Série teses e monografias, n. 11).Tese (Doutorado em Geografia) - Instituto de Geografia - Universidade de São Paulo, 1974.

Cruz, O. Evolução de vertentes nas escarpas da Serra do Mar em Caraguatatuba. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 47, p. 479-480, 1975.

Cunha, S. B.; Guerra, A. J. T. Degradação ambiental. In: Guerra, A. J. T.; Cunha, S. B. (Ed.) **Geomorfologia e meio ambiente.** Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1996. Cap. 7, p. 337-379.

D'Alge, J. C. L. **Atualização cartográfica por imagem de satélite: considerações teóricas e possibilidades de implementação.** São José dos Campos: INPE, 1997. Disponível em: <<http://www.dpi.inpe.br/~julio/consult1.pdf>>. Acesso em: 14 set. 2002.

Dai, F. C.; Lee, C. F. Landslide characteristics and slope instability modeling using GIS, Lantau Island, Hong Kong. **Geomorphology**, v. 42, n. 3-4, p. 213-228, Jan. 2002.

Dai, F. C.; Lee, C. F.; Ngai, Y. Y. Landslide risk assessment and management: an overview. **Engineering Geology**, v. 64, n. 1, p. 65-87, Abr. 2002.

De Biasi, M. A carta clinográfica: os métodos de representação e sua confecção. **Revista do Departamento de Geografia**, n. 6, p. 45-61, 1992.

De Ploey, J.; Cruz, O. Landslides in the Serra do Mar, Brazil. **Catena**, v. 6, p. 111-122, 1979.

Defesa Civil/MG. **Balancete das chuvas - 1º semestre de 2003.** 2003b. Disponível em: <www.defesacivil.mg.gov.br>. Acesso em: 29 jan. 2003.

Defesa Civil/MG. **Balancete das chuvas - 2º semestre de 2002.** 2003a. Disponível em: <www.defesacivil.mg.gov.br>. Acesso em: 29 jan. 2003.

Defesa Civil/SP. **Principais ocorrências atendidas (1995-2002).** 2003. Disponível em: <www.defesacivil.cmil.sp.gov.br>. Acesso em: 29 jan. 2003.

Degg, M. Natural disasters: recent trends and future prospects. **Geography**, v. 77, n. 336, p. 198-209, Jul. 1992.

Dhakal, A. S.; Amada, T.; Aniya, M. Landslide hazard mapping and its evaluation using GIS: an investigation of sampling schemes for a grid-cell based quantitative method. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v. 66, n. 8, p. 981-989, Ago. 2000.

- Dias, F. P. **Análise da susceptibilidade a deslizamentos no bairro Saco Grande, Florianópolis - SC**. Florianópolis. 96p. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade Federal de Santa Catarina, 2000.
- Dikau, R.; Cavallin, A.; Jäger, S. Databases and GIS for landslide research in Europe. **Geomorphology**, v. 15, n. 3-4, p. 227-239, Abr. 1996.
- Donati, L.; Turrini, M. C. An objective method to rank the importance of the factors predisposing to landslide with the GIS methodology: application to an area of the Apennines (Valnerina; Perugia, Italy). **Engineering Geology**, v. 63, n. 3-4, p. 277-289, Mar. 2002.
- Ehlers, M. Multisensor image fusion techniques in remote sensing. **Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 46, n. 1, p. 19-30, Fev. 1991.
- Einstein, H. H. Landslide risk - systematic approaches to assessment and management. In: Cruden, D. M.; Fell, R. (Ed.) **Landslide risk assessment**. Rotterdam: Balkema, 1997. p. 25-50.
- Estrada, M.; Kohiyama, M. Detection of damage due to the 2001 El Salvador earthquake using Landsat images. In: Asian Conference on Remote Sensing, 22., Singapore, 2001. **Proceedings...** Singapore: CRISP/SISV/AARS, 2001. p. 1372-1377.
- Felgueiras, C. A. Modelagem numérica de terreno. In: Câmara, G.; Davis, C., Monteiro, A. M. V. (Ed.) **Introdução à ciência da geoinformação**. Disponível em: <<http://www.dpi.inpe.br/gilberto/livro/introd/index.html>> Acesso em: 23 nov. 2001.
- Fernandes, M. C.; Lagüéns, J. V. M.; Coelho Netto, A. L. O processo de ocupação por favelas e sua relação com os eventos de escorregamentos no maciço da Tijuca/RJ. **Anuário do Instituto de Geociências**, v. 22, p. 45-59, 1999.
- Fernandes, N. F.; Amaral, C. P. Movimentos de massa: uma abordagem geológico-geomorfológica. In: Guerra, A. J. T.; Cunha, S. B. (Ed.) **Geomorfologia e meio ambiente**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1996. Cap. 3, p. 123-194.
- Fernandes, N. F.; Guimarães, R. F.; Gomes, R. A. T.; Vieira, B. C.; Montgomery, D. R.; Greenberg, H. Condicionantes geomorfológicos dos escorregamentos nas encostas: avaliação de metodologias e aplicação de modelo de previsão de áreas susceptíveis. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 2, n. 1, p. 51-71, 2001.
- Fernández, C. I.; Castillo, T. F.; Hamdouni, R.; Montero, J. C. Verification of landslide susceptibility mapping: a case study. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 24, n. 6, p. 537-544, Jun. 1999.
- Fiori, A. P. Fatores que influem na análise de vertentes e no movimento de massa em encostas. **Boletim Paranaense de Geografia**, n. 43, p. 7-24, 1995.
- Fiori, A. P.; Borchardt, N. Influência da vegetação na estabilidade de taludes naturais. **Boletim Paranaense de Geografia**, n. 45, p. 43-58, 1997.
- Fiori, A. P.; Carmignani, L. **Fundamentos de mecânica dos solos e rochas: aplicações na estabilidade de taludes**. Curitiba: Editora da UFPR, 2001. 550 p.

Florenzano, T. G. **Unidades geomorfológicas da região sudeste (SP) identificadas por imagens de satélite**. São Paulo. 164p. Tese (Doutorado em Geografia) – Universidade de São Paulo, 1993.

Francisco, C. N. **Mapeamento das áreas de riscos de deslizamentos e desmoronamentos do Parque da Tijuca (RJ) e entorno através de Sistemas Geográficos de Informação**. 1996. Disponível em: <<http://www.carto.eng.uerj.br/fgeorj/segeo1996/120/index.htm>> Acesso em: 25 ago. 2001.

Garguet-Duport, B.; Girel, J.; Chassery, J.; Pautou, G. The use of multiresolution analysis and wavelets transform for merging Spot panchromatic and multispectral image data. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v. 62, n. 9, p. 1057-1066, Set. 1996.

Gökceoglu, C.; Aksoy, H. Landslide susceptibility mapping of the slopes in the residual soils of the Mengen region (Turkey) by deterministic stability analyses and image processing techniques. **Engineering Geology**, v. 44, n. 1-4, p. 147-161, 1996.

Grasso, D. N. Applications of the IHS color transformation for 1:24,000-scale geologic mapping: a low cost SPOT alternative. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v. 59, n. 1, p. 73-80, Jan. 1993.

Guerra, A. J. T. Processos erosivos nas encostas. In: Guerra, A. J. T.; Cunha, S. B. (Ed.) **Geomorfologia: uma atualização de bases e conceitos**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1995. Cap. 4, p. 149-209.

Guerra, A. J. T.; Botelho, R. G. M. Erosão dos Solos. In: Cunha, S. B.; Guerra, A. J. T. (Ed.) **Geomorfologia do Brasil**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1998. Cap. 5, p. 181-228.

Guerra, A. T.; Guerra, A. J. T. **Novo dicionário geológico-geomorfológico**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2001. 652 p.

Guidicini, G.; Iwasa, O. Y. **Ensaio de correlação entre pluviosidade e escorregamentos em meio tropical úmido**. São Paulo: IPT, 1976. 48 p. (Relatório n. 1080)

Guidicini, G.; Nieble, C. M. **Estabilidade de taludes naturais e de escavação**. São Paulo: Edgard Blücher, 1993. 196 p.

Guthrie, R. H. The effects of logging on frequency and distribution of landslides in three watersheds on Vancouver Island, British Columbia. **Geomorphology**, v. 43, n. 3-4, p. 273-292, Mar. 2002.

Gutjahr, M. R.; Tavares, R.; Pereira, P. R. B.; Santoro, J. Os estudos climáticos na compreensão dos movimentos de massa na Serra do Mar/SP. In: Simpósio Brasileiro de Climatologia Geográfica, 4., Rio de Janeiro, 2000. **Anais...** Rio de Janeiro: UFRJ, 2000. 7p.

Guzzetti, F.; Carrara, A.; Cardinali, M.; Reichenbach, P. Landslide hazard evaluation: a review of current techniques and their application in a multi-scale study, Central/Italy. **Geomorphology**, v. 31, n. 1-4, p. 181-216, Dez. 1999.

Herrmann, M. L. P. **Levantamento dos desastres naturais ocorridos em Santa Catarina no período de 1980 a 2000**. Florianópolis: IOESC, 2001. 89 p.

IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo. **Diagnóstico da situação atual dos recursos hídricos da Unidade de Gerenciamento dos Recursos Hídricos do Litoral Norte: relatório final**. São Paulo: IPT, 2000. (Relatório n. 46.172).

IUGS Working Group on Landslides. Quantitative risk assessment for slopes and landslides - The state of the art. In: Cruden, D. M.; Fell, R. (Ed.) **Landslide risk assessment**. Rotterdam: Balkema, 1997. p. 3-12.

Jakob, M. The impacts of loggings on landslide activity at Clayoquot Sound, British Columbia. **Catena**, v. 38, n. 4, p. 279-300, Fev. 2000.

Klein, R. M. **Contribuição ao Conhecimento da Flora da Vegetação do Vale do Itajaí – Santa Catarina**. São Paulo. 412p. Tese (Doutorado em Ciências - Área de Botânica) – Instituto de Biociências, Universidade de São Paulo, 1979.

Larsen, M. C.; Torres-Sánchez, A. J. The frequency and distribution of recent landslide in three montane tropical regions of Puerto Rico. **Geomorphology**, v. 24, n. 4, p. 309-331, Set. 1998.

Lavell, A. Degradación ambiental, riesgo y desastres urbanos. Problemas y conceptos: hacia la definición de una agenda de investigación. In: Fernández, M. A. (Ed.) **Ciudades en riesgo: degradación ambiental, riesgos urbanos y desastres**. Cap. 2, p. 12-42, 1996. Disponível em: <www.desenredando.org>. Acesso em: 05 jun. 2001.

Lepsch, I. F. **Formação e conservação dos solos**. São Paulo: Oficina de Textos, 2002. 178p.

Leroi, E. Landslide risk mapping: problems, limitations and developments. In: Cruden, D. M.; Fell, R. (Ed.) **Landslide risk assessment**. Rotterdam: Balkema, 1997. p. 239-250.

Li, S.; Kwok, J. T.; Wang, Y. Using the discrete wavelet frame transform to merge Landsat TM and SPOT panchromatic images. **Information Fusion**, v. 3, n. 1, p. 17-23, Mar. 2002.

Lillesand, T. M.; Keefe, R. W. **Remote sensing and image interpretation**. New York: John Wiley & Sons, 1994. 750 p.

Lopes, J. A. U. **Os movimentos coletivos dos solos e a evolução das encostas naturais nas regiões tropicais e subtropicais úmidas**. Curitiba. 157p. Dissertação (Mestrado em Geologia) - Universidade Federal do Paraná - UFPR, 1995.

Mafra, N. M. C. Erosão e planificação de uso do solo. In: Guerra, A. J. T.; Silva, A. S.; Botelho, R. G. M. (Ed.) **Erosão e conservação dos solos: conceitos, temas e aplicações**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1999. Cap. 9, p. 301-322.

Mantovani, F.; Soeters, R.; Westen, C. J. Remote sensing techniques for landslides studies and hazard zonation in Europe. **Geomorphology**, v. 15, n. 3-4, p. 213-225, Abr. 1996.

- Marcelino, E. V.; Fonseca, L. M. G.; Ventura, F.; Rosa, A. N. C. S. Evaluation of IHS, PCA and Wavelet Transform fusion techniques for the identification of landslide scars using satellite data. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 11., Belo Horizonte, 2003. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2003a. p. 487-494.
- Marcelino, E. V.; Formaggio, A. R.; D'Álge, J. C. L. A influência do datum planimétrico no registro de imagens. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 11., Belo Horizonte, 2003. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2003b. p. 333-340.
- Mather, P. M. **Computer processing of remotely-sensed images: an introduction.** Chichester, UK: John Wiley & Sons, 1999. 292 p.
- McDermid, G. J.; Franklin, S. E. Spectral, spatial, and geomorphometric variables for the remote sensing of slope processes. **Remote Sensing of Environment**, v. 49, n.1, p. 57-71, 1994.
- McGwire, K. C. Cross-validated assessment of geometric accuracy. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 62, n. 10, p. 1179-1187, 1996.
- McKean, J.; Buechel, S.; Gaydos, L. Remote sensing and landslide hazard assessment. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v. 57, n. 9, p. 1185-1193, Set. 1991.
- MEM – Ministry of Energy and Mines. Geological Survey Branch. **Landslide in British Columbia.** Victoria: MEN, 1997. (Information Circular IC1995-7).
- Monteiro, C. A. F. **A dinâmica climática e as chuvas no Estado de São Paulo.** São Paulo: IG/USP, 1973. 130 p.
- Monteiro, C. A. F. **Clima e excepcionalismo: conjecturas sobre o desempenho da atmosfera como fenômeno geográfico.** Florianópolis: Editora da UFSC, 1991. 241 p.
- Moore, H. D. SPOT vs Landsat TM for the maintenance of topographical databases. **Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 44, p. 72-84, 1989.
- Moraes, M. T. Região tem 32,6 mil pessoas em área de risco. **Jornal Folha de São Paulo.** São Paulo, 11 set. 2002. Caderno Folha Vale, p. C 1.
- Moreira, F. R. S. **Uso da avaliação de técnicas de integração e análise espacial de dados em pesquisa mineral aplicadas ao planalto de Poços de Caldas.** São José dos Campos. 164p. (INPE-9481-TDI/825). Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2001.
- Morrissey, M. M.; Wieczorek, G. F.; Morgan, B. A. A comparative analysis of hazard models for predicting debris flow in Madison County, Virginia. **U.S. Geological Survey Open-File Report 01-0067.** 13 p., 2001. Disponível em: <http://geology.cr.usgs.gov/pub/open_file_reports/ofr_01_0067/ofr_01_0067.htm>. Acesso em: 22 ago. 2001.
- Mousinho, M. R.; Bigarella, J. J. Movimentos de massa no transporte dos detritos da meteorização das rochas. **Boletim Paranaense de Geografia**, n. 16-17, p. 43-83, Jul. 1965.

- Nimer, E. Clima. In: IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Geografia do Brasil**. v. 3. Rio de Janeiro: IBGE, 1977. p. 51-89.
- Ogura, A.; Macedo, E. S. Procesos y riesgos geológicos. In: **II Curso internacional de aspectos geológicos de protección ambiental**: notas de classes. Montevideo: UNESCO, 2002. Cap. 8, p. 114-137.
- Okida, R. **Técnicas de sensoriamento remoto como subsídio ao zoneamento de áreas sujeitas a movimentos gravitacionais de massa e a inundações**. São José dos Campos. 147p. (INPE-6343-TDI/595). Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 1996.
- Parise, M. Landslide mapping techniques and their use in the assessment of the landslide hazard. **Physics and Chemistry of the Earth, Part C: Solar, Terrestrial & Planetary Science**, v. 26, n. 9, p. 697-703, Set. 2001.
- Pellerin, J.; Duarte, G. M.; Scheibe, L. F.; Mendonça, M.; Buss, M. D.; Monteiro, M. A. Timbé do Sul – Jacinto Machado: avaliação preliminar da extensão da catástrofe de 23-24/12/95. **Geosul**, v. 12, n. 23, p. 71-86, 1997.
- Penteado, M. M. **Fundamentos de geomorfologia**. Rio de Janeiro: IBGE, 1974. 158 p.
- Petry, S. Desabrigado de 2001 reconstrói vida. **Jornal Folha de São Paulo**. São Paulo, 2 fev. 2003. Caderno Folha Vale, p. C 7.
- Pohl, C. **Geometric aspects of multisensor image fusion for topographic map updating in the humid tropics**. Enschede: ITC, 1996. 159 p. (ITC Publication n. 30)
- Pohl, C. **Geometric aspects of multisensor image fusion for topographic map updating in the humid tropics**. Enchesde: ITC, 1996 159 p. (ITC Publication n. 39).
- Pohl, C. Tools and methods used in data fusion. In: Gudmandsen. (Ed.) **Future trends in remote sensing**. Rotterdam: Balkema, 1998. p. 391-399.
- Pohl, C.; Genderen, J. L. Multisensor image fusion in remote sensing: concepts, methods and applications. **International Journal of Remote Sensing**, v. 19, n. 5, p. 823-854, 1998.
- Prandini, F. L.; Guidicini, G.; Bottura, J. A.; Ponçano, W. L.; Santos, A. R. **Atuação da cobertura vegetal na estabilidade de encostas**: uma resenha crítica. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo - IPT, 1976. 38 p. (Relatório n. 1.074)
- Ramos, C. S.; Sanchez, M. C. Estudo metodológico de classificação de dados para cartografia temática. **Geografia**, v. 25, n. 2, p. 23-52, Ago. 2000.
- Salomão, F. X. T. Controle e prevenção dos processos erosivos. In: Guerra, A. J. T.; Silva, A. S.; Botelho, R. G. M. (Ed.) **Erosão e conservação dos solos**: conceitos, temas e aplicações. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1999. Cap. 7, p. 229-268.
- Sauchyn, D. J.; Trench, N. R. Landsat Applied to Landslide Mapping. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 44, n. 6, p. 735-741, 1978.
- Schowengerdt, R. A. **Remote sensing, models and methods for image processing**. San Diego: Academic Press, 1997. 522 p.

- Selby, M. J. **Earth's changing surface**. Oxford: Clarendon Press, 1985.
- Selby, M. J. **Hillslope materials and process**. Oxford: Oxford University Press, 1982. 264p.
- Sestini, M. F. **Variáveis geomorfológicas no estudo de deslizamentos em Caraguatatuba-SP utilizando imagens TM-Landsat e SIG**. São José dos Campos. 140p. (INPE-7511-TDI/724). Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 1999.
- Silva, A. J. F. M. **Modelos de correção geométrica para imagens HRV - SPOT**. São José dos Campos. 239p. (INPE-5001-TDL/395). Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - INPE, 1988.
- SMA - Secretaria do Meio Ambiente do Estado de São Paulo. **Planos de manejo das unidades de conservação: Parque Estadual da Serra do Mar - Núcleo Caraguatatuba/São Sebastião**. São Paulo: SMA, 1998. 151 p.
- Souza, L. B. Dinâmica pluvial, movimentos de massa e algumas possibilidades de contribuição da climatologia geográfica. **Geografia**, v. 27, n. 2, p. 131-140, Ago. 2002.
- Storey, J. C. Landsat 7 on-orbit modulation transfer function estimation. In: Sensors, Systems, and Next Generation Satellites, 5., Toulouse, 2001. **Proceedings...** Bellingham, USA: SPIE, 2001. p. 50-61.
- Temesgen, B.; Mohammed, M. U.; Korme, T. Natural hazard assessment using GIS and remote sensing methods, with particular reference to the landslides in the Wondogenet Area, Ethiopia. **Physics and Chemistry of the Earth, Part C: Solar, Terrestrial & Planetary Science**, v. 26, n. 9, p. 665-675, Set. 2001.
- Terlien, M. T. J.; Asch, T. W. J.; Westen, C. J. Deterministic modeling in GIS-Based landslide hazard assessment. In: Carrara, A.; Guzzetti, F. (Ed.) **Geographical information system in assessing natural hazards**. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1995. Cap. 4, p. 57-78.
- Thomas, M. F. **Geomorphology in the tropics. A study of weathering and denudation in low latitudes**. New York: John Wiley & Sons, 1994. 460 p.
- Troya, H. **Fusión de imágenes satelitales IRS-1C y TM para identificación de elementos urbanos**. São José dos Campos. 76 p. Monografia (Especialização - XIII Curso Internacional de Sensoriamento Remoto e Sistemas de Informações Geográficas) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 1999.
- Ventura, F. N. **Fusão de imagens de sensores remotos utilizando a transformação wavelet**. São José dos Campos. 216p. (Em processo de publicação). Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2002.
- Ventura, F. N.; Fonseca, L. M. G.; Santa Rosa, A. N. C. Remotely sensed image fusion using the Wavelet Transform. In: International Symposium on Remote Sensing of Environment, 29., Buenos Aires, 2002. **Proceedings...** Buenos Aires: ISPRS, 2002, 4 p.

- Vergara, O. R.; Kurkdjian, M. L. N. O.; D'Alge, J. C. L.; Pereira, M. N. Conteúdo informativo e exatidão geométrica de dados TM – Landsat analógicos para atualização de cartas topográficas. In: Congresso Brasileiro de Cartografia, 18., Rio de Janeiro, 1997. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 1997. (INPE-6403-PRE/2450).
- Walsh, S. J.; Butler, D. R. Morphometric and multispectral image analysis of debris flows for natural hazard assessment. **Geocarto International**, v. 12, n. 1, p. 59-70, Mar. 1997.
- Welch, R.; Jordan, T. R.; Ehlers, M. Comparative evaluations of the geodetic accuracy and cartographic potencial of Landsat – 4 and Landsat – 5 Thematic Mapper image data. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 51, n. 9, p. 1249-1262, 1985.
- Westen, C. J.; Rengers, N.; Terlien, M. T. J.; Soeters, R. Prediction of the occurrence of slope instability phenomena through GIS-based hazard zonation. **Geologische Rundschau**, v. 86, n. 2, p. 404-414, Set. 1997.
- Westen, C. J.; Seijmonsbergen, A. C.; Mantovani, F. Comparing landslide hazard mapping. **Natural Hazards**, v. 20, n. 2-3, p. 137-158, Nov. 1999.
- Westen, C. J.; Terlien, M. T. J. An approach towards deterministic landslide hazard analysis in GIS. A case study from Manizales (Colombia). **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 21, n. 9, p. 853-868, Set. 1996.
- Westen, C.J.; Soeters, R.; Sijmons, K. Digital geomorphological landslide hazard mapping of the Alpago area, Italy. **JAG: International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 2, n. 1, p. 51-60, 2000.
- Wilkie, D. S.; Finn, J.T. **Remote sensing for natural resources monitoring: a guide for first-time users**. New York: Columbia University Press, 1996. 295 p.
- Wolle, C. M. **Análise de escorregamentos translacionais numa região da Serra do Mar no contexto de classificação de mecanismos de instabilização de encostas**. São Paulo. 800p. Tese (Doutorado em Engenharia) - Escola Politécnica - Universidade de São Paulo, 1988.
- Wolle, C. M.; Carvalho, C. S. Escorregamentos em encostas na Serra do Mar – Brasil. **Solos e Rochas**, v. 12, n. único, p. 27-36, 1989.
- Wolle, C. M.; Guidicini, G.; Araújo, J. S.; Pedrosa, J. A. B. A. **Caracterização de um mecanismo de escorregamentos nas encostas da Serra do Mar**. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo - IPT, 1977. 23 p. (Relatório n. 1.079)
- Wong, H. N.; Ho, K. K. S.; Chan, Y. C. Assessment of consequence of landslides. In: Cruden, D. M.; Fell, R. (Ed.) **Landslide risk assessment**. Rotterdam: Balkema, 1997. p. 111-149.
- Xavier, H. Como as pessoas percebem deslizamentos de encostas? In: Simpósio Nacional de Geografia Aplicada, 6., Goiânia, 1995. **Anais...** Goiânia: UFG, 1995. p. 204-208.

Yocky, D. A. Multiresolution wavelet decomposition image merger of Landsat Thematic Mapper and Spot panchromatic data. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v. 62, n. 9, p. 1067-1074, Set. 1996.

Zêzere, J. L.; Ferreira, A. B.; Rodrigues, M. L. Landslide in the North of Lisbon Region (Portugal): conditioning and triggering factors. **Physics and Chemistry of the Earth, Part A: Solid Earth and Geodesy**, v. 24, n. 10, p. 925-934, 1999.

Zhou, C. H.; Lee, C. F.; Li, J.; Xu, Z. W. On the spatial relationship between landslides and causative factors on Lantau Island, Hong Kong. **Geomorphology**, v. 43, n. 3-4, p. 197-207, Mar. 2002.

Zhou, J.; Civco, D. L.; Silander, J. A. A wavelet transform method to merge Landsat TM and Spot panchromatic data. **International Journal of Remote Sensing**, v. 19, n. 4, p. 743-757, Mar. 1998.

Zinck, J. A.; López, J.; Metternicht, G. I.; Shrestha, D. P.; Vásquez-Selem, L. Mapping and modelling mass movements and gullies in mountainous areas using remote sensing and GIS techniques. **JAG: International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 3, n. 1, p. 43-53, 2001.

APÊNDICE A

PROGRAMAS ELABORADOS EM LEGAL

Programa A.1 – Programa para ponderação das classes das variáveis geoambientais com base na frequência de cicatrizes de escorregamentos.

a) *Hipsometria*

```
{
Tematico hip ("Hipsometria");
Numerico hipN ("Numerico_Hip");
Tabela Hippondera (Ponderacao);
hip= Recuperar(Nome="Altimetria");
hipN = Novo(Nome="Hip_N",ResX=10,ResY=10,Escala=10000, Min=0, Max=397);
Hippondera = Novo (CategoriaIni="Hipsometria",
    "0 - 20":4,
    "20 - 50":14,
    "50 - 100":46,
    "100 - 200":85,
    "200 - 300":84,
    "300 - 400":68,
    "400 - 500":50,
    "500 - 600":27,
    "600 - 700":12,
    "700 - 800":5,
    "800 - 900":2,
    "900 - 1000":0,
    "1000 - 1100":0,
    "1100 - 1200":0,
    "1200 - 1300":0,
    "> 1300 m":0);
hipN=(Pondere(hip,Hippondera));
}
```

b) *Declividade*

```
{
Tematico dec ("Declividade");
Numerico decN ("Numerico_Dec");
Tabela decpondera (Ponderacao);
dec = Recuperar(Nome="Gradiente");
decN = Novo(Nome="Dec_N",ResX=10,ResY=10,Escala=10000, Min=0, Max=397);
decpondera = Novo (CategoriaIni="Declividade",
    "0 - 5":10,
    "5 - 12":7,
    "12 - 30":25,
    "30 - 47":69,
    "47 - 100":263,
    "> 100%":23);
decN=(Pondere(dec,decpondera));
}
```

c) *Orientação das encostas*

```
{
Tematico ori ("Orientacao");
Numerico oriN ("Numerico_Ori");
Tabela Oripondera (Ponderacao);
ori= Recuperar(Nome="Aspecto");
oriN = Novo(Nome="Ori_N",ResX=10,ResY=10,Escala=10000, Min=0, Max=397);
Oripondera = Novo (CategoriaIni="Orientacao",
"0 - 22.5":16,
"22.5 - 67.5":33,
"67.5 - 112.5":70,
"112.5 - 157.5":101,
"157.5 - 202.5":72,
"202.5 - 247.5":24,
"247.5 - 292.5":12,
"292.5 - 337.5":52,
"337.5 - 360":17);
oriN=(Pondere(ori,Oripondera));
}
```

d) *Distâncias de rios*

```
{
Tematico rio ("Distancia_rio");
Numerico rioN ("Numerico_Rio");
Tabela Riopondera (Ponderacao);
rio= Recuperar(Nome="Rios");
rioN = Novo(Nome="Rio_N",ResX=10,ResY=10,Escala=10000, Min=0, Max=397);
Riopondera = Novo (CategoriaIni="Distancia_rio",
"0 - 100":160,
"100 - 200":127,
"200 - 300":60,
"300 - 400":26,
"400 - 500":15,
"> 500 m":9);
rioN=(Pondere(rio,Riopondera));
}
```

e) *Distâncias de estradas*

```
{
Tematico est ("Distancia_est");
Numerico estN ("Numerico_Est");
Tabela Estpondera (Ponderacao);
est= Recuperar(Nome="Estradas");
estN = Novo(Nome="Est_N",ResX=10,ResY=10,Escala=10000, Min=0, Max=397);
Estpondera = Novo (CategoriaIni="Distancia_est",
"0 - 100":25,
"100 - 200":26,
"200 - 300":26,
"300 - 400":21,
"400 - 500":17,
"> 500 m":282);
estN=(Pondere(est,Estpondera));
}
```

f) *Distâncias de lineamentos*

```
{
Tematico lin ("Distancia_lin");
Numerico linN ("Numerico_Lin");
Tabela Linpondera (Ponderacao);
lin= Recuperar(Nome="Lineamentos");
linN = Novo(Nome="Lin_N",ResX=10,ResY=10,Escala=10000, Min=0, Max=397);
Linpondera = Novo (CategoriaIni="Distancia_lin",
    "0 - 100":65,
    "100 - 200":67,
    "200 - 300":51,
    "300 - 400":54,
    "400 - 500":36,
    "> 500 m":124);
linN=(Pondere(lin,Linpondera));
}
```

g) *Geologia*

```
{
Tematico lit ("Geologia");
Numerico litN ("Numerico_Lit");
Tabela Litpondera (Ponderacao);
lit= Recuperar(Nome="Litologia");
litN = Novo(Nome="Lit_N",ResX=10,ResY=10,Escala=10000, Min=0, Max=397);
Litpondera = Novo (CategoriaIni="Geologia",
    "Depositos de encosta":16,
    "Migmatitos":28,
    "Sedimentos marinhos":0,
    "Depositos litoraneos":0,
    "Granitoides":346,
    "Sedimentos continentais":7,
    "Sedimentos fluvio-lagunares":0,
    "Sedimentos marinhos Fm Cananeia":0);
litN=(Pondere(lit,Litpondera));
}
```

h) *Pedologia*

```
{
Tematico ped ("Pedologia");
Numerico pedN ("Numerico_Ped");
Tabela Pedpondera (Ponderacao);
ped = Recuperar(Nome="Solos");
pedN = Novo(Nome="Ped_N",ResX=10,ResY=10,Escala=10000, Min=0, Max=397);
Pedpondera = Novo (CategoriaIni="Pedologia",
    "Latossolo VA + Cambissolo":4,
    "Cambissolo":370,
    "Espodossolo + Neossolo":7,
    "Neossolo Regolítico":16,
    "Praia":0);
pedN=(Pondere(ped,Pedpondera));
}
```

i) *Uso e cobertura da terra*

```
{
Tematico uso ("UsoTerra");
Numerico usoN ("Numerico_Uso");
Tabela Usopondera (Ponderacao);
uso = Recupere(Nome="Uso");
usoN = Novo(Nome="Uso_N",ResX=10,ResY=10,Escala=10000, Min=0, Max=397);
Usopondera = Novo (Categorialni="UsoTerra",
    "Mata atlantica":198,
    "Mata alterada":46,
    "Restinga":0,
    "Restinga alterada":0,
    "Varzea":0,
    "Mangue alterado":0,
    "Vegetacao alterada":12,
    "Desmatamento + afloramento":113,
    "Praia":0,
    "Varzea alterada":0,
    "Ocupacao humana":13,
    "Pastagem":15,
    "Reflorestamento":0);
usoN=(Pondere(uso,Usopondera));
}
```

Programa A.2 – Programa para reclassificação das variáveis geoambientais em classes

Favorável (1) e Não-favorável (0) utilizadas no método Booleano.

a) *Hipsometria*

```
{
Tematico hip ("Hipsometria");
Numerico hipB ("MNT_BOO_Hip");
Tabela Hippondera (Ponderacao);
hip= Recupere(Nome="Altimetria");
hipB = Novo(Nome="Hip_B",ResX=10,ResY=10,Escala=10000, Min=0, Max=1);
Hippondera = Novo (Categorialni="Hipsometria",
    "0 - 20":0,
    "20 - 50":1,
    "50 - 100":1,
    "100 - 200":1,
    "200 - 300":1,
    "300 - 400":1,
    "400 - 500":1,
    "500 - 600":1,
    "600 - 700":0,
    "700 - 800":0,
    "800 - 900":0,
    "900 - 1000":0,
    "1000 - 1100":0,
    "1100 - 1200":0,
    "1200 - 1300":0,
    "> 1300 m":0);
hipB=(Pondere(hip,Hippondera));
}
```

b) Declividade

```
{
Tematico dec ("Declividade");
Numerico decB ("MNT_BOO_Dec");
Tabela decpondera (Ponderacao);
dec = Recupere(Nome="Gradiente");
decB = Novo(Nome="Dec_B",ResX=10,ResY=10,Escala=10000, Min=0, Max=1);
decpondera = Novo (CategoriaIni="Declividade",
    "0 - 5":0,
    "5 - 12":0,
    "12 - 30":1,
    "30 - 47":1,
    "47 - 100":1,
    "> 100%":1);
decB=(Pondere(dec,decpondera));
}
```

c) Orientação das encostas

```
{
Tematico ori ("Orientacao");
Numerico oriB ("MNT_BOO_Ori");
Tabela Oripondera (Ponderacao);
ori= Recupere(Nome="Aspecto");
oriB = Novo(Nome="Ori_B",ResX=10,ResY=10,Escala=10000, Min=0, Max=1);
Oripondera = Novo (CategoriaIni="Orientacao",
    "0 - 22.5":0,
    "22.5 - 67.5":1,
    "67.5 - 112.5":1,
    "112.5 - 157.5":1,
    "157.5 - 202.5":1,
    "202.5 - 247.5":0,
    "247.5 - 292.5":0,
    "292.5 - 337.5":1,
    "337.5 - 360":0);
oriB=(Pondere(ori,Oripondera));
}
```

d) Distâncias de rios

```
{
Tematico rio ("Distancia_rio");
Numerico rioB ("MNT_BOO_Rio");
Tabela Riopondera (Ponderacao);
rio= Recupere(Nome="Rios");
rioB = Novo(Nome="Rio_B",ResX=10,ResY=10,Escala=10000, Min=0, Max=1);
Riopondera = Novo (CategoriaIni="Distancia_rio",
    "0 - 100":1,
    "100 - 200":1,
    "200 - 300":0,
    "300 - 400":0,
    "400 - 500":0,
    "> 500 m":0);
rioB=(Pondere(rio,Riopondera));
}
```

e) *Distâncias de estradas*

```
{
Tematico est ("Distancia_est");
Numerico estB ("MNT_BOO_Rua");
Tabela Estpondera (Ponderacao);
est= Recuperar(Nome="Estradas");
estB = Novo(Nome="Est_B",ResX=10,ResY=10,Escala=10000, Min=0, Max=1);
Estpondera = Novo (CategoriaIni="Distancia_est",
"0 - 100":1,
"100 - 200":1,
"200 - 300":0,
"300 - 400":0,
"400 - 500":0,
"> 500 m":0);
estB=(Pondere(est,Estpondera));
}
```

f) *Distâncias de lineamentos*

```
{
Tematico lin ("Distancia_lin");
Numerico linB ("MNT_BOO_Lin");
Tabela Linpondera (Ponderacao);
lin= Recuperar(Nome="Lineamentos");
linB = Novo(Nome="Lin_B",ResX=10,ResY=10,Escala=10000, Min=0, Max=1);
Linpondera = Novo (CategoriaIni="Distancia_lin",
"0 - 100":1,
"100 - 200":1,
"200 - 300":0,
"300 - 400":0,
"400 - 500":0,
"> 500 m":0);
linB=(Pondere(lin,Linpondera));
}
```

g) *Geologia*

```
{
Tematico lit ("Geologia");
Numerico litB ("MNT_BOO_Lit");
Tabela Litpondera (Ponderacao);
lit= Recuperar(Nome="Litologia");
litB = Novo(Nome="Lit_B",ResX=10,ResY=10,Escala=10000, Min=0, Max=1);
Litpondera = Novo (CategoriaIni="Geologia",
"Depositos de encosta":1,
"Migmatitos":1,
"Sedimentos marinhos":0,
"Depositos litoraneos":0,
"Granitoides":1,
"Sedimentos continentais":0,
"Sedimentos fluvio-lagunares":0,
"Sedimentos marinhos Fm Cananeia":0);
litB=(Pondere(lit,Litpondera));
}
```

h) *Pedologia*

```
{
Tematico ped ("Pedologia");
Numerico pedB ("MNT_BOO_Ped");
Tabela Pedpondera (Ponderacao);
ped = Recuperar(Nome="Solos");
pedB = Novo(Nome="Ped_B",ResX=10,ResY=10,Escala=10000, Min=0, Max=1);
Pedpondera = Novo (CategoriaIni="Pedologia",
    "Latosolo VA + Cambissolo":0,
    "Cambissolo":1,
    "Espodosolo + Neossolo":0,
    "Neossolo Regolítico":1,
    "Praia":0);
pedB=(Pondere(ped,Pedpondera));
}
```

i) *Uso e cobertura da terra*

```
{
Tematico uso ("UsoTerra");
Numerico usoB ("MNT_BOO_Uso");
Tabela Usopondera (Ponderacao);
uso = Recuperar(Nome="Uso_ZEE");
usoB = Novo(Nome="Uso_B",ResX=10,ResY=10,Escala=10000, Min=0, Max=1);
Usopondera = Novo (CategoriaIni="UsoTerra",
    "Mata atlantica":1,
    "Mata alterada":1,
    "Restinga":0,
    "Restinga alterada":0,
    "Varzea":0,
    "Mangue alterado":0,
    "Vegetacao alterada":1,
    "Desmatamento + afloramento":1,
    "Praia":0,
    "Varzea alterada":0,
    "Ocupacao humana":1,
    "Pastagem":1,
    "Reflorestamento":0);
usoB=(Pondere(uso,Usopondera));
}
```

Programa A.3 – Programa para ponderação das variáveis geoambientais com base no cálculo do Contraste (C_w) utilizado no método Probabilidade Condicional.

a) *Hipsometria*

```
{
Tematico hip ("Hipsometria");
Numerico hipP ("MNT_PROB_Hip");
Tabela Hippondera (Ponderacao);
hip= Recuperar(Nome="Altimetria");
hipP = Novo(Nome="Hip_P",ResX=10,ResY=10,Escala=10000, Min=-10, Max=10);
Hippondera = Novo (CategoriaIni="Hipsometria",
    "0 - 20":-2.37,
    "20 - 50":1.06,
    "50 - 100":2.19,
    "100 - 200":2.38,
    "200 - 300":2.52,
    "300 - 400":2.36,
    "400 - 500":2.14,
    "500 - 600":0.86,
    "600 - 700":-0.26,
    "700 - 800":-1.15,
    "800 - 900":-2.22,
    "900 - 1000":-5,
    "1000 - 1100":-5,
    "1100 - 1200":-5,
    "1200 - 1300":-5,
    "> 1300 m":-5);
hipP=(Pondere(hip,Hippondera));
}
```

b) *Declividade*

```
{
Tematico dec ("Declividade");
Numerico decP ("MNT_PROB_Dec");
Tabela decpondera (Ponderacao);
dec = Recuperar(Nome="Gradiente");
decP = Novo(Nome="Dec_P",ResX=10,ResY=10,Escala=10000, Min=-10, Max=10);
decpondera = Novo (CategoriaIni="Declividade",
    "0 - 5":-1.64,
    "5 - 12":-0.92,
    "12 - 30":-0.05,
    "30 - 47":0.94,
    "47 - 100":3,
    "> 100%":2.67);
decP=(Pondere(dec,decpondera));
}
```

c) *Orientação das encostas*

```
{
Tematico ori ("Orientacao");
Numerico oriP ("MNT_PROB_Ori");
Tabela Oripondera (Ponderacao);
ori= Recuperar(Nome="Aspecto");
oriP = Novo(Nome="Ori_P",ResX=10,ResY=10,Escala=10000, Min=-10, Max=10);
Oripondera = Novo (CategoriaIni="Orientacao",
    "0 - 22.5":0.85,
    "22.5 - 67.5":0.86,
    "67.5 - 112.5":1.57,
    "112.5 - 157.5":1.48,
    "157.5 - 202.5":1.39,
    "202.5 - 247.5":0.62,
    "247.5 - 292.5":0.10,
    "292.5 - 337.5":1.15,
    "337.5 - 360":0.87);
oriP=(Pondere(ori,Oripondera));
}
```

d) *Distâncias de rios*

```
Tematico rio ("Distancia_rio");
Numerico rioP ("MNT_PROB_Rio");
Tabela Riopondera (Ponderacao);
rio= Recuperar(Nome="Rios");
rioP = Novo(Nome="Rio_P",ResX=10,ResY=10,Escala=10000, Min=-10, Max=10);
Riopondera = Novo (CategoriaIni="Distancia_rio",
    "0 - 100":1.43,
    "100 - 200":1.86,
    "200 - 300":1.63,
    "300 - 400":1.15,
    "400 - 500":0.81,
    "> 500 m":-4.54);
rioP=(Pondere(rio,Riopondera));
}
```

e) *Distâncias de estradas*

```
{
Tematico est ("Distancia_est");
Numerico estP ("MNT_PROB_Rua");
Tabela Estpondera (Ponderacao);
est= Recuperar(Nome="Estradas");
estP = Novo(Nome="Est_P",ResX=10,ResY=10,Escala=10000, Min=-10, Max=10);
Estpondera = Novo (CategoriaIni="Distancia_est",
    "0 - 100":0.92,
    "100 - 200":1.15,
    "200 - 300":1.30,
    "300 - 400":1.21,
    "400 - 500":1.10,
    "> 500 m":-0.98);
estP=(Pondere(est,Estpondera));
}
```

f) *Distâncias de lineamentos*

```
{
Tematico lin ("Distancia_lin");
Numerico linP ("MNT_PROB_Lin");
Tabela Linpondera (Ponderacao);
lin= Recuperar(Nome="Lineamentos");
linP = Novo(Nome="Lin_P",ResX=10,ResY=10,Escala=10000, Min=-10, Max=10);
Linpondera = Novo (CategoriaIni="Distancia_lin",
    "0 - 100":1.93,
    "100 - 200":2.02,
    "200 - 300":1.75,
    "300 - 400":1.89,
    "400 - 500":1.54,
    "> 500 m":-2.46);
linP=(Pondere(lin,Linpondera));
}
```

g) *Geologia*

```
{
Tematico lit ("Geologia");
Numerico litP ("MNT_PROB_Lit");
Tabela Litpondera (Ponderacao);
lit= Recuperar(Nome="Litologia");
litP = Novo(Nome="Lit_P",ResX=10,ResY=10,Escala=10000, Min=-10, Max=10);
Litpondera = Novo (CategoriaIni="Geologia",
    "Depositos de encosta":1.02,
    "Migmatitos":0.2,
    "Sedimentos marinhos":-5,
    "Depositos litoraneos":-5,
    "Granitoides":3.87,
    "Sedimentos continentais":-0.21,
    "Sedimentos fluvio-lagunares":-5,
    "Sedimentos marinhos Fm Cananeia":-5);
litP=(Pondere(lit,Litpondera));
}
```

h) *Pedologia*

```
{
Tematico ped ("Pedologia");
Numerico pedP ("MNT_PROB_Ped");
Tabela Pedpondera (Ponderacao);
ped = Recuperar(Nome="Solos");
pedP = Novo(Nome="Ped_P",ResX=10,ResY=10,Escala=10000, Min=-10, Max=10);
Pedpondera = Novo (CategoriaIni="Pedologia",
    "Latossolo VA + Cambissolo":-1.99,
    "Cambissolo":4.67,
    "Espodossolo + Neossolo":-1.28,
    "Neossolo Regolítico":1.02,
    "Praia":-5);
pedP=(Pondere(ped,Pedpondera));
}
```

i) *Uso e cobertura da terra*

```
{
Tematico uso ("UsoTerra");
Numerico usoP ("MNT_PROB_Uso");
Tabela Usopondera (Ponderacao);
uso = Recupere(Nome="Uso_ZEE");
usoP = Novo(Nome="Uso_P",ResX=10,ResY=10,Escala=10000, Min=-10, Max=10);
Usopondera = Novo (Categorialni="UsoTerra",
    "Mata atlantica":1.51,
    "Mata alterada":2.31,
    "Restinga alterada":-5,
    "Varzea":-5,
    "Mangue alterado":-5,
    "Vegetacao alterada":1.73,
    "Desmatamento + afloramento":4.45,
    "Praia":-5,
    "Varzea alterada":-5,
    "Ocupacao humana":0.59,
    "Pastagem":-0.03,
    "Reflorestamento":-5);
usoP=(Pondere(uso,Usopondera));
}
```

Programa A.4 – Programa para integração das variáveis geoambientais pelo método Booleano.

```
{
//Booleano
// Definicao dos dados de entrada
Numerico var1 ("MNT_BOO_Dec");
Numerico var2 ("MNT_BOO_Hip");
Numerico var3 ("MNT_BOO_Lin");
Numerico var4 ("MNT_BOO_Lit");
Numerico var5 ("MNT_BOO_Ori");
Numerico var6 ("MNT_BOO_Ped");
Numerico var7 ("MNT_BOO_Rio");
Numerico var8 ("MNT_BOO_Rua");
Numerico var9 ("MNT_BOO_Uso");
// Definicao do dado de saida
Numerico var10 ("MNT_BOO");
// Recuperacao dos dados de entrada
var1 = Recupere (Nome="Dec_B");
var2 = Recupere (Nome="Hip_B");
var3 = Recupere (Nome="Lin_B");
var4 = Recupere (Nome="Lit_B");
var5 = Recupere (Nome="Ori_B");
var6 = Recupere (Nome="Ped_B");
var7 = Recupere (Nome="Rio_B");
var8 = Recupere (Nome="Est_B");
var9 = Recupere (Nome="Uso_B");
// Criacao do dado de saida
var10 = Novo (Nome="Boo_risco", ResX=10, ResY=10, Escala=10000,
    Min=0, Max=1);
// Geracao da media
var10 = ((var1 + var2+ var3+ var4+ var5+ var6+ var7+ var8+ var9)/9);
}
```

Programa A.5 – Programa para integração das variáveis geoambientais pelo método
Média Ponderada.

```
{
//Media ponderada
// Pesos aplicados
// Numerico_Dec = 9
// Numerico_Est = 8
// Numerico_Hip = 4
// Numerico_Lin = 7
// Numerico_Lit = 8
// Numerico_Ori = 5
// Numerico_Ped = 3
// Numerico_Rio = 7
// Numerico_Uso = 6
// Definicao dos dados de entrada
Numerico var1 ("Numerico_Dec");
Numerico var2 ("Numerico_Est");
Numerico var3 ("Numerico_Hip");
Numerico var4 ("Numerico_Lin");
Numerico var5 ("Numerico_Lit");
Numerico var6 ("Numerico_Ori");
Numerico var7 ("Numerico_Ped");
Numerico var8 ("Numerico_Rio");
Numerico var9 ("Numerico_Uso");
// Definicao do dado de saida
Numerico var10 ("Risco_MEDIA");
// Recuperacao dos dados de entrada
var1 = Recupere (Nome="Dec_N");
var2 = Recupere (Nome="Est_N");
var3 = Recupere (Nome="Hip_N");
var4 = Recupere (Nome="Lin_N");
var5 = Recupere (Nome="Lit_N");
var6 = Recupere (Nome="Ori_N");
var7 = Recupere (Nome="Ped_N");
var8 = Recupere (Nome="Rio_N");
var9 = Recupere (Nome="Uso_N");
// Criacao do dado de saida
var10 = Novo (Nome="Media", ResX=10, ResY=10, Escala=10000, Min=0, Max=10000);
// Geracao da media ponderada
var10 = ((9*var1 + 8*var2+ 4*var3+ 7*var4+ 8*var5+ 5*var6 + 3*var7+ 7*var8+ 6*var9)/9);
}
```

Programa A.6 – Programa para integração das variáveis geoambientais pelo método AHP.

```
{
// AHP
// Pesos aplicados
// Numerico_Dec = 0.398 - GI
// Numerico_Est = 0.197 - GI
// Numerico_Hip = 0.043 - GI
// Numerico_Lin = 0.142 - GI
// Numerico_Geo = 0.183 - GI
// Numerico_Ori = 0.170 - GII
// Numerico_Ped = 0.073 - GII
// Numerico_Rio = 0.473 - GII
// Numerico_Uso = 0.284 - GII
// Razao de consistencia - Grupo I
// CR = 0.028
// Razao de consistencia - Grupo II
// CR = 0.019
// Definicao dos dados de entrada
Numerico var1 ("Numerico_Dec");
Numerico var2 ("Numerico_Est");
Numerico var3 ("Numerico_Hip");
Numerico var4 ("Numerico_Lin");
Numerico var5 ("Numerico_Lit");
Numerico var6 ("Numerico_Ori");
Numerico var7 ("Numerico_Ped");
Numerico var8 ("Numerico_Rio");
Numerico var9 ("Numerico_Uso");
// Definicao do dado de saida
Numerico var10 ("Risco_AHP");
// Recuperacao dos dados de entrada
var1 = Recuperare (Nome="Dec_N");
var2 = Recuperare (Nome="Est_N");
var3 = Recuperare (Nome="Hip_N");
var4 = Recuperare (Nome="Lin_N");
var5 = Recuperare (Nome="Lit_N");
var6 = Recuperare (Nome="Ori_N");
var7 = Recuperare (Nome="Ped_N");
var8 = Recuperare (Nome="Rio_N");
var9 = Recuperare (Nome="Uso_N");
// Criacao do dado de saida
var10 = Novo (Nome="AHP", ResX=10, ResY=10, Escala=10000, Min=0, Max=10000);
// Geracao da soma ponderada
var10 = 0.398*var1 + 0.197*var2+ 0.043*var3+ 0.142*var4+ 0.183*var5+ 0.170*var6 + 0.073*var7+ 0.473*var8+
0.284*var9;
}
```

Programa A.7 – Programa para integração das variáveis geoambientais pelo método Probabilidade Condicional.

```
{
//Probabilidade Condicional
// Pesos aplicados
// MNT_PROB_Dec = 3.72
// MNT_PROB_Est = 1.33
// MNT_PROB_Hip = 4.62
// MNT_PROB_Lin = 2.75
// MNT_PROB_Lit = 5.42
// MNT_PROB_Ori = 5.52
// MNT_PROB_Ped = 5.47
// MNT_PROB_Rio = 4.71
// MNT_PROB_Uso = 4.72
// Definicao dos dados de entrada
Numerico var1 ("MNT_PROB_Dec");
Numerico var2 ("MNT_PROB_Est");
Numerico var3 ("MNT_PROB_Hip");
Numerico var4 ("MNT_PROB_Lin");
Numerico var5 ("MNT_PROB_Lit");
Numerico var6 ("MNT_PROB_Ori");
Numerico var7 ("MNT_PROB_Ped");
Numerico var8 ("MNT_PROB_Rio");
Numerico var9 ("MNT_PROB_Uso");
// Definicao do dado de saida
Numerico var10 ("Risco_PROB");
// Recuperacao dos dados de entrada
var1 = Recupere (Nome="Dec_P");
var2 = Recupere (Nome="Est_P");
var3 = Recupere (Nome="Hip_P");
var4 = Recupere (Nome="Lin_P");
var5 = Recupere (Nome="Lit_P");
var6 = Recupere (Nome="Ori_P");
var7 = Recupere (Nome="Ped_P");
var8 = Recupere (Nome="Rio_P");
var9 = Recupere (Nome="Uso_P");
// Criacao do dado de saida
var10 = Novo (Nome="PROB_COND_III", ResX=10, ResY=10, Escala=10000, Min=-10000, Max=10000);
// soma ponderada
var10 = 3.72*var1 + 1.33*var2+ 4.62*var3+ 2.72*var4+ 5.42*var5+ 5.52*var6 + 5.47*var7+ 4.71*var8+ 4.72*var9;
}
```

APÊNDICE B

IMAGENS SINTÉTICAS RESULTANTES DAS FUSÕES REALIZADAS PARA O CASO HRV/ETM

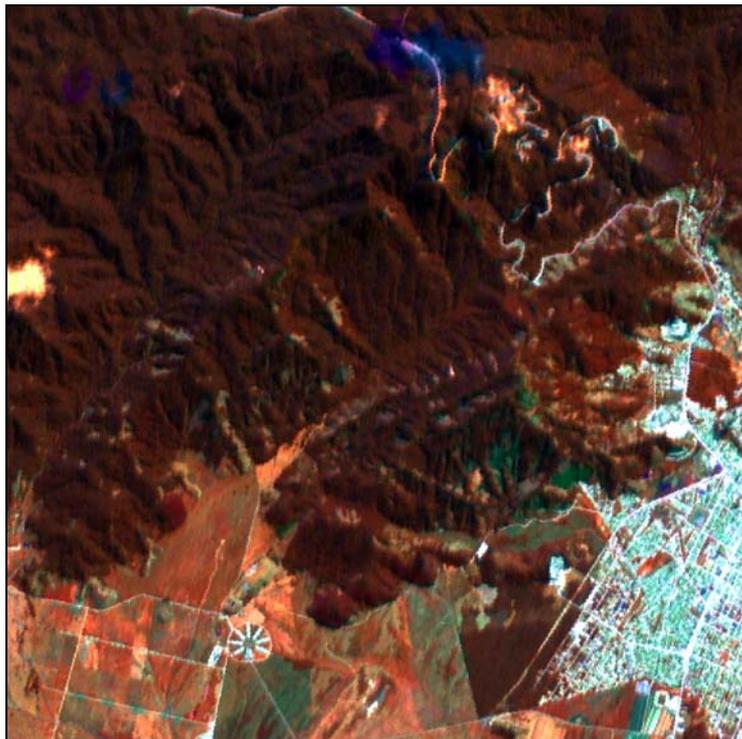


FIGURA B.1 – Composição colorida das bandas sintéticas geradas pelo método Brovey para o caso HRV/ETM.

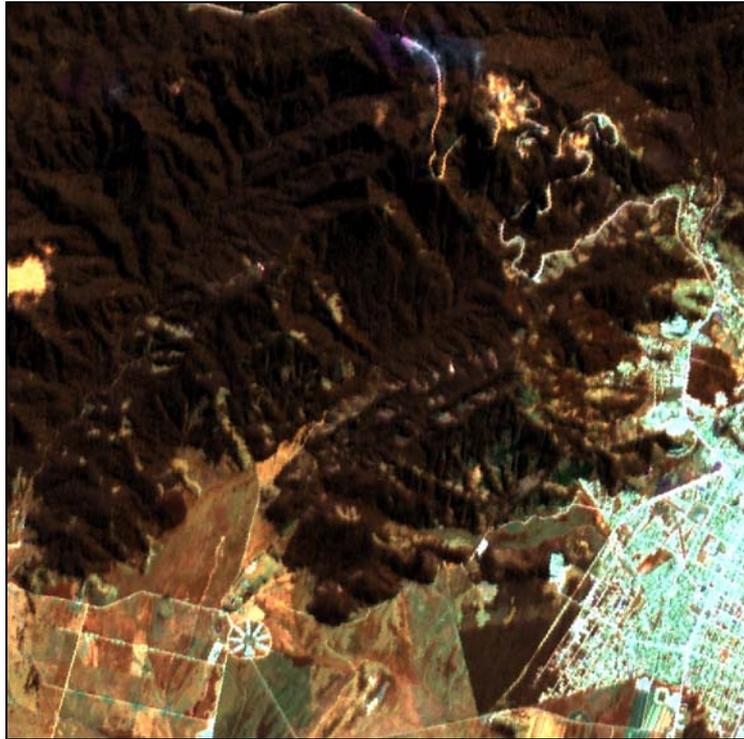


FIGURA B.2 – Composição colorida das bandas sintéticas geradas pelo método HSV para o caso HRV/ETM.



FIGURA B.3 – Composição colorida das bandas sintéticas geradas pelo método IHS para o caso HRV/ETM.



FIGURA B.4 – Composição colorida das bandas sintéticas geradas pelo método PCA para o caso HRV/ETM.

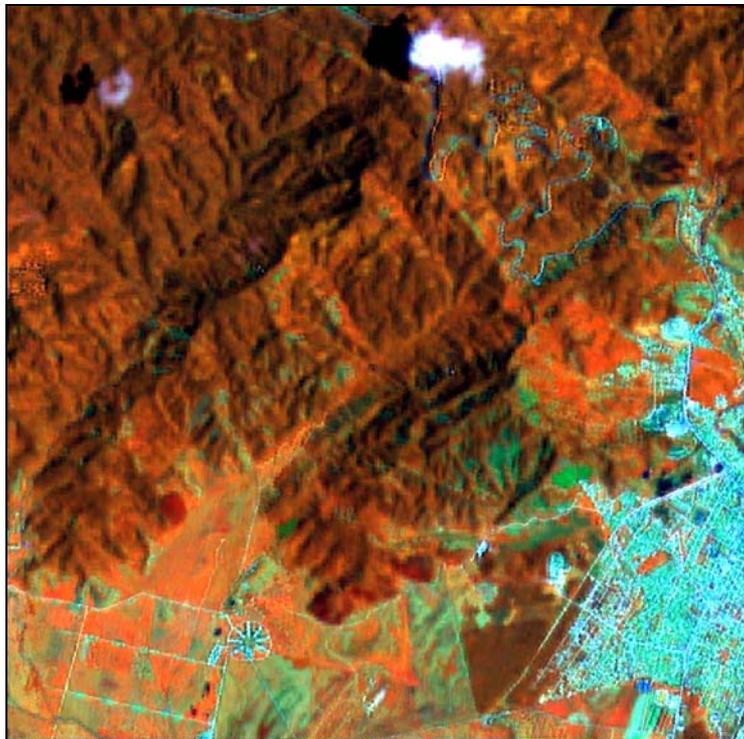


FIGURA B.5 – Composição colorida das bandas sintéticas geradas pelo método WTVE para o caso HRV/ETM.

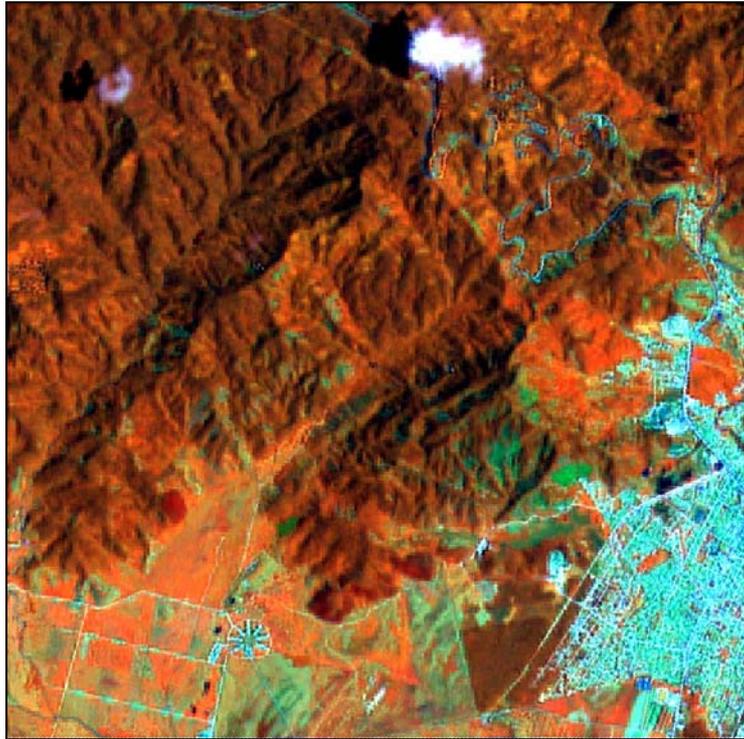


FIGURA B.6 – Composição colorida das bandas sintéticas geradas pelo método WTYO para o caso HRV/ETM.

APÊNDICE C

IMAGENS SINTÉTICAS RESULTANTES DAS FUSÕES REALIZADAS PARA O CASO ETM/ETM

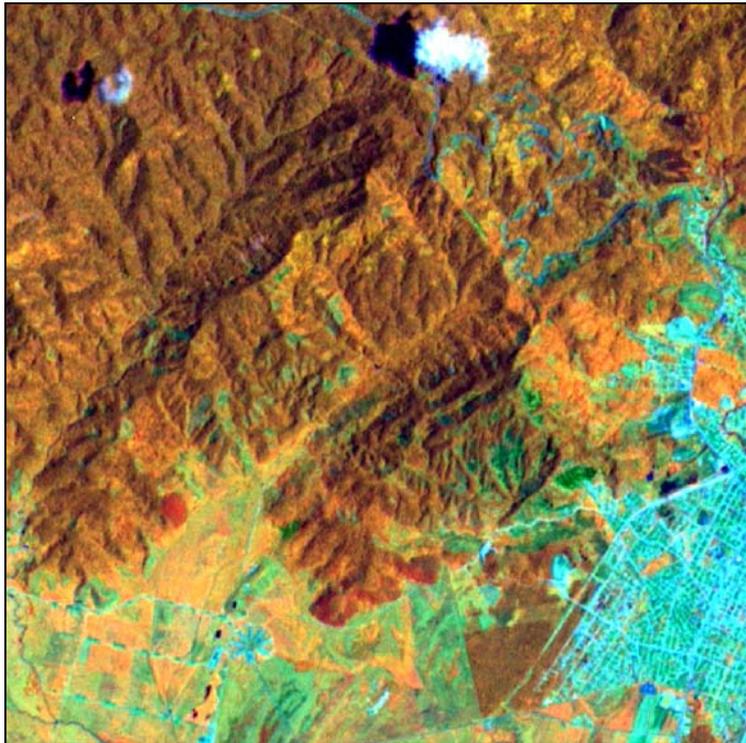


FIGURA C.1 – Composição colorida das bandas sintéticas geradas pelo método Brovey para o caso ETM/ETM.

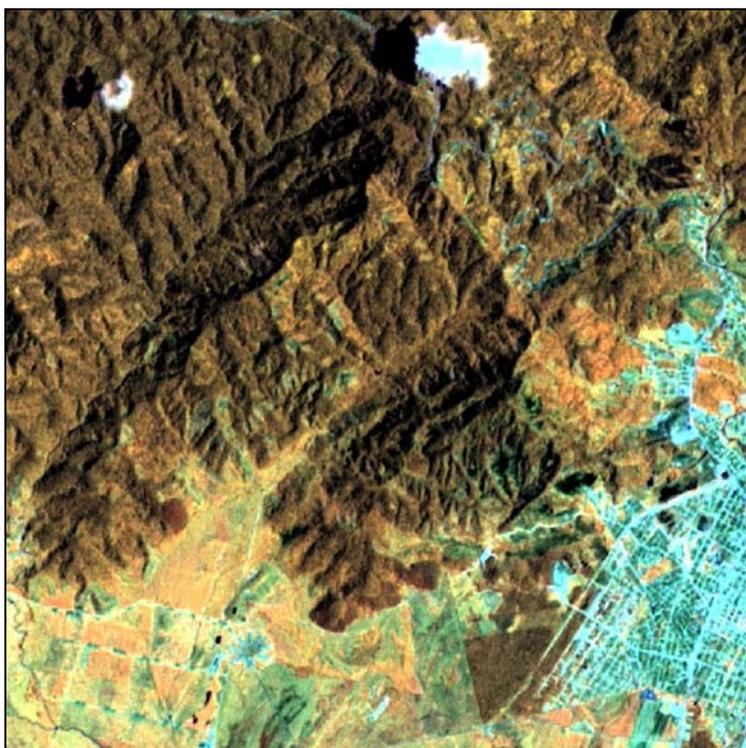


FIGURA C.2 – Composição colorida das bandas sintéticas geradas pelo método HSV para o caso ETM/ETM.

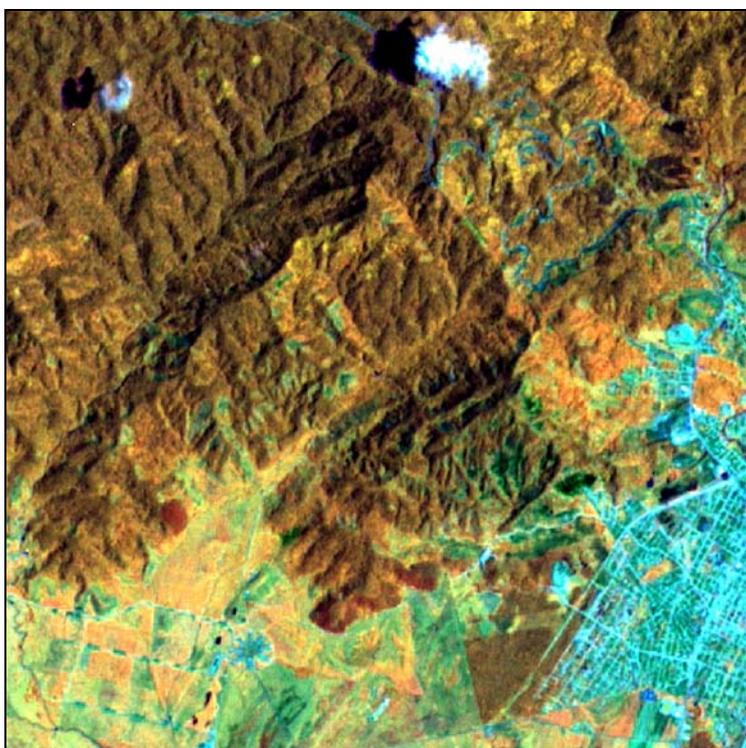


FIGURA C.3 – Composição colorida das bandas sintéticas geradas pelo método IHS para o caso ETM/ETM.

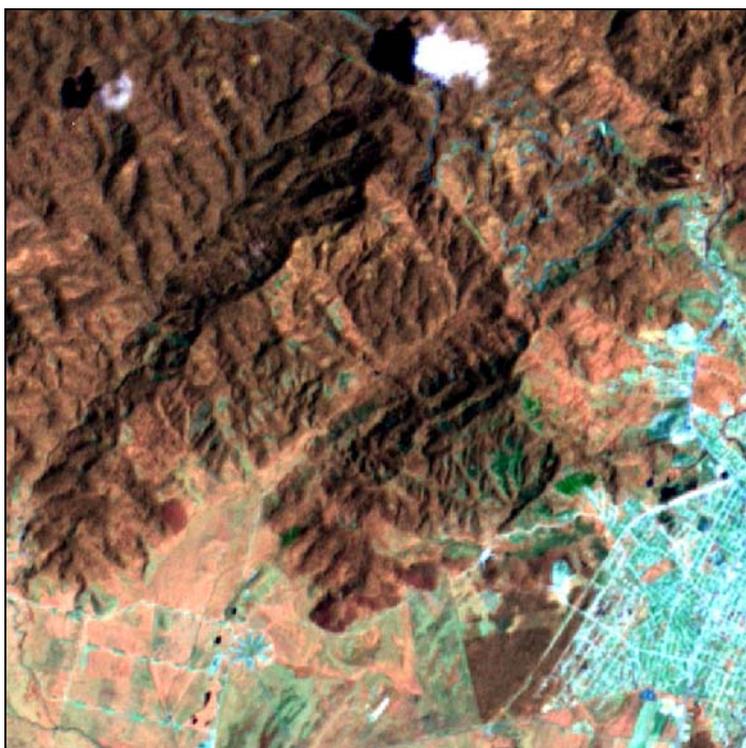


FIGURA C.4 – Composição colorida das bandas sintéticas geradas pelo método PCA para o caso ETM/ETM.

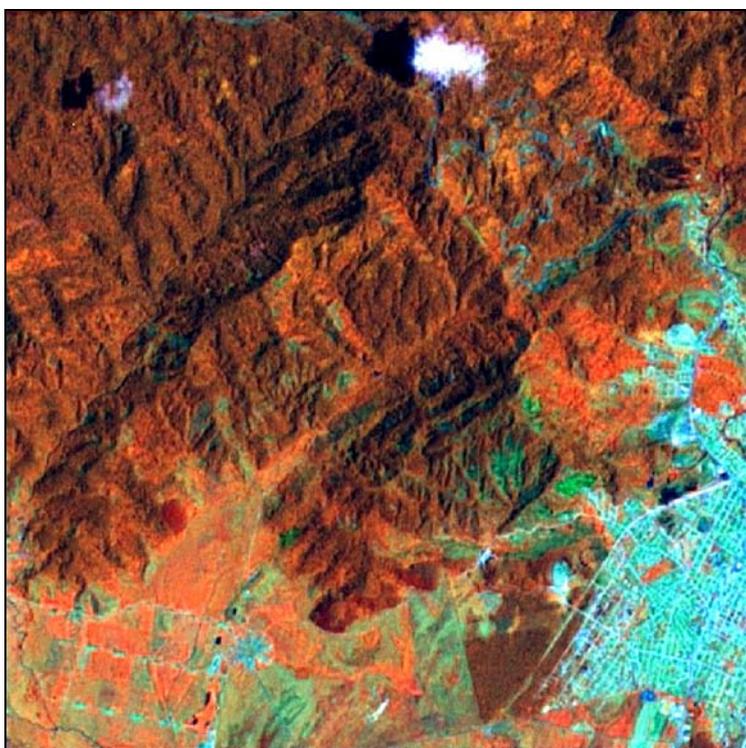


FIGURA C.5 – Composição colorida das bandas sintéticas geradas pelo método WTVE para o caso ETM/ETM.

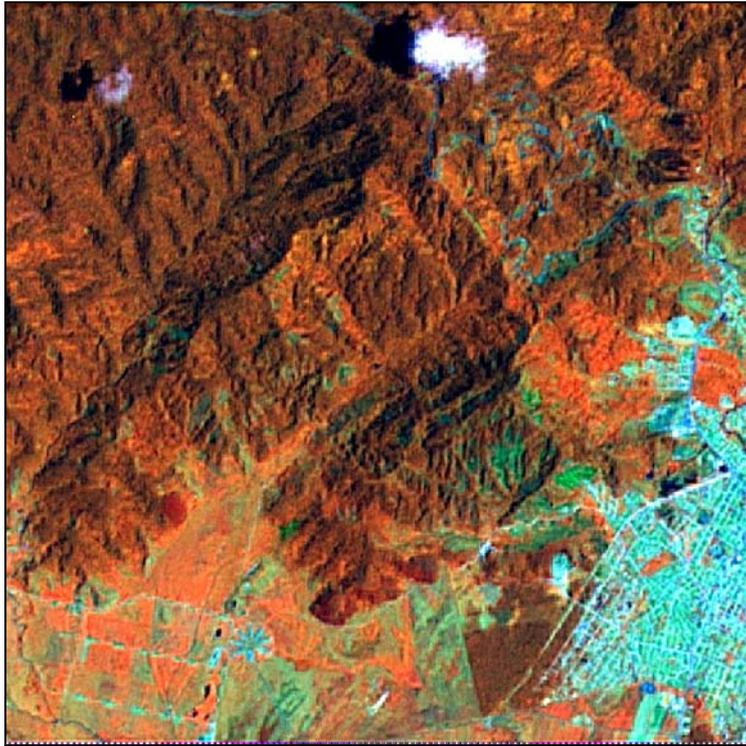


FIGURA C.6 – Composição colorida das bandas sintéticas geradas pelo método WTYO para o caso ETM/ETM.