

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

INPE-7511-TDI/724

**VARIÁVEIS GEOMORFOLÓGICAS NO ESTUDO DE
DESLIZAMENTOS EM CARAGUATATUBA-SP UTILIZANDO
IMAGENS TM-LANDSAT E SIG**

Marcelo Francisco Sestini

Dissertação de Mestrado em Sensoriamento Remoto, orientada pela Dra. Teresa Gallotti
Florenzano, aprovada em 13 de julho de 1999.

INPE
São José dos Campos
2000

528 .711.7

SESTINI, M. F.

Variáveis geomorfológicas no estudo de deslizamentos em Caraguatatuba – SP utilizando imagens TM-LANDSAT e SIG / M. F. Sestini – São José dos Campos: INPE, 1999. 144p. – (INPE-7511-TDI/724).

1.Sensoriamento remoto. 2.Geomorfologia. 3.Deslizamentos. 4.Processamento de imagens. 5.Sistemas de Informações Geográficas (SIG). I.Título

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

Dr^a Teresa Gallotti Florenzano



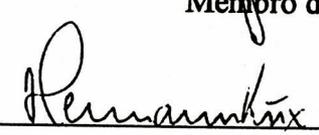
Presidente/Orientadora

Dr^a Evlyn Márcia Leão de Moraes Novo



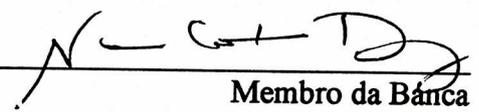
Membro da Banca

Dr. Hermann Johann Heinrich Kux



Membro da Banca

Dr^a Noris Costa Diniz



Membro da Banca
Convidada

Candidato: Marcelo Francisco Sestini

São José dos Campos, 13 de julho de 1999.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Dra Teresa Florenzano pela orientação e entusiasmo demonstrado durante a elaboração desta dissertação.

À banca examinadora, pela disposição em analisar esta dissertação.

À Rosana Okida pela prestatividade e apoio a este trabalho.

À Samara (Instituto Oceanográfico), ao pessoal do Instituto Geológico (em especial à Lydia e à Lucy Hidalgo), por cederem os dados necessários e pelas recomendações que muito ajudaram o desenvolvimento deste trabalho.

À Cláudia e Comissão de Defesa Civil de Caraguatatuba, pela assistência e ao Jornal Vale Paraibano, que permitiu a consulta de seus arquivos.

Ao Centro Tecnológico de Hidráulica por ceder os dados de pluviosidade utilizados neste trabalho.

Ao pessoal do Departamento de Processamento de Imagens do INPE (em especial ao Carlos Felgueiras e ao João Pedro), ao Dr Raimundo Almeida Filho, Dr Dalton Valeriano, Dr Lênio Galvão e ao ao Camilo Rennó, que sempre se mostraram prestativos no esclarecimento de dúvidas e na proposta de sugestões.

A todos os colegas do Departamento de Sensoriamento Remoto e do Laboratório de Informática do Serviço de Pós Graduação (SPG), pelo companheirismo, em especial ao Luciano Penido (pela ajuda no SPRING), Francisco Maldonado (por ensinar a utilizar o ERDAS) e ao Cláudio Correa, pela assistência constante no SPG.

À coordenação do curso de Sensoriamento Remoto pelo apoio na realização deste trabalho; à Etel, pela dedicação extrema aos alunos.

Ao INPE, pela oportunidade de realizar o mestrado e à CAPES pela bolsa concedida.

RESUMO

O objetivo deste trabalho é identificar áreas de deslizamentos utilizando variáveis geomorfológicas (principalmente as morfométricas) extraídas por técnicas de processamentos de dados de sensoriamento remoto e sistema de informações geográficas (SIG) Este estudo foi desenvolvido em um setor da Serra do Mar, no município de Caraguatatuba (Estado de São Paulo), a qual é susceptível a movimentos de massa. Neste estudo foram utilizados dados TM Landsat, fotografias aéreas e mapas topográficos. Técnicas de processamento de imagens como ampliação linear de contraste, filtragem espacial, razão e multiplicação entre bandas e transformação por componentes principais foram aplicadas de forma a destacar elementos relacionados a deslizamentos. A composição colorida TM 473 RGB foi a que mais contribuiu para a distinção de diferentes cicatrizes de deslizamentos. As composições coloridas com componentes principais 321 RGB e razão entre bandas 5/7 4/3 4/1 RGB destacaram as cicatrizes e as feições antrópicas. A composição colorida com multiplicação entre bandas 5x4 2x4 7x4 RGB destacaram as feições do relevo. As variáveis geomorfológicas (altitude, amplitude altimétrica, declividade, aspecto, formas de vertentes e densidade de drenagem) foram extraídas tanto de Modelo Numérico de Terreno (MNT) quanto a partir da interpretação e análise das imagens. Através de SIG foram obtidos os índices morfométricos e a integração de dados, de forma a gerar um mapa de áreas de risco de movimentos de massa. Muitos dos resultados obtidos mostraram-se compatíveis com os resultados obtidos por outros autores e através de outras abordagens, para a mesma área de estudo.

GEOMORPHOLOGICAL VARIABLES FOR LANDSLIDE ASSESSMENT IN CARAGUATATUBA-SP USING LANDSAT – TM IMAGES AND GIS

ABSTRACT

The objective of this study is to identify landslides areas using geomorphological variables (mainly morphometric) derived from both remote sensing data processing and Geographic Information Systems (GIS) techniques. This study was carried out on a sector of Serra do Mar in the municipality of Caraguatatuba (São Paulo state) subjected to mass movement hazards. Data from Landsat-TM, aerial photography and topographic maps were used in this study. Image processing techniques such as linear contrast stretch, spatial filtering, image ratioing and multiplication and principal components transformations were applied to enhance features related to landslide. The colour composition TM 473 RGB contributed most effectively to discriminate landslide scar differences. The both colour compositions with principal components 321 RGB and ratio band composition 5/7 4/3 4/1 RGB highlighted antropic features and landslide scar. The colour composition with band multiplication 5x4 2x4 7x4 RGB highlighted relief features. Geomorphological variables: elevation, slope gradient, slope aspect, slope form and drainage density were extracted from both a Digital Elevation Model (DEM) and image analysis. GIS techniques were used to derive morphometric indices, to data integration and to obtain a landslide hazard map. Most of the results obtained agree with those obtained by other authors and other approaches used in the same region under study.

SUMÁRIO

Pág.

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELA

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO	15
1.1 Justificativa.....	15
1.2 Objetivo.....	17
CAPÍTULO 2 - FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	19
2.1 Movimentos de Massa.....	19
2.1.1 Introdução.....	19
2.1.2 Variáveis Condicionantes de Movimentos de Massa.....	20
2.1.3 Classificação de Movimentos de Massa.....	29
2.2 Dados de Sensoriamento Remoto e Técnicas de Geoprocessamento no Estudo de Risco de Deslizamentos.....	34
CAPÍTULO 3 - ÁREA DE ESTUDO.....	41
3.1 Localização.....	41
3.2 Caracterização.....	41
CAPÍTULO 4 - MATERIAIS E MÉTODO.....	47
4.1 Materiais.....	47
4.2 Método.....	50
4.2.1 Seleção da Área de Estudo e Coleta de Dados.....	50
4.2.2 Processamento de Imagens TM.....	53
4.2.2.1 Pré processamentos.....	54
4.2.2.2 Seleção de Bandas e Obtenção de Composições Coloridas.....	56
4.2.2.3 Técnicas de Realce de Imagens.....	59
4.2.2.4 Interpretação de Dados de Sensoriamento Remoto.....	65
4.2.3 Tratamento de Dados em SIG.....	68
4.2.3.1 Esquema Conceitual de SIG e Uso do SPRING (Sistema de Processamento de Informações Geográficas).....	68
4.2.3.2 Operações entre PI's.....	71
CAPÍTULO 5 - RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	81
5.1 Pré processamentos.....	81
5.2 Análise das Imagens TM Realçadas por ALC.....	81
5.3 Multiplicação entre Bandas.....	90
5.4 Razão entre Bandas.....	93

5.5	Transformação por Componentes Principais.....	97
5.6	Resumo dos Resultados Obtidos através dos Processamentos.....	99
5.7	Geração Automática de Carta de Risco.....	103
CAPÍTULO 6 - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....		115
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....		119
APÊNDICE A - BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTAR		131
APÊNDICE B - PROGRAMAS ELABORADOS EM LEGAL.....		133
APÊNDICE C - CARTAS DE VARIÁVEIS MORFOMÉTRICAS GERADAS A PARTIR DO MNT.....		141

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
2.1 Formas de vertentes	26
2.2 Processos geomorfológicos dominantes em uma vertente.....	27
2.3 Tipos de movimentos de massa.....	30
2.4 Esquema dos componentes de um deslizamento superposto às curvas de nível.....	33
3.1 Localização da área de estudo	42
4.1 Fluxograma metodológico.....	48
4.2 Precipitação média mensal ao longo do período considerado.....	52
4.3 Algumas das áreas de risco relacionadas na Tabela 4.3	53
4.4 Bandas do TM e comportamento espectral de alguns objetos	57
4.5 TIN sem e com linha de quebra.....	70
5.1 Setor da bacia do rio Santo Antônio, composições 473 RGB e 572 RGB.....	83
5.2 Cicatrizes apresentando rocha exposta e cobertura de capim, TM 473 RGB.....	85
5.3 Perfis espectrais dos setores que apresentam rocha exposta e revestidos por cobertura vegetal rasteira.....	85
5.4 Cicatrizes no espigão localizado na porção da área de estudo e ao longo da SP 99 TM473 RGB.....	86
5.5 Cicatrizes em composição TM 473 RGB e fotografia aérea (1994) da mesma área.....	87
5.6 Rampas compostas por material transportado.....	88
5.7 Cicatrizes de deslizamentos.....	88
5.8 Samambaia sobre antigas cicatrizes.....	88
5.9 Cicatrizes apresentando solo exposto.....	89
5.10 Composições coloridas TM 473 RGB e 5x4 2x4 7x4 RGB.....	91
5.11 Vista da área de estudo, composição 5x4 2x4 7x4 RGB	92
5.12 Feições detacadas nas imagens NDVI e razão 4/3	94
5.13 Feições detacadas na composição 5/7 4/3 4/1 RGB e na imagem NDVI em relação à composição 473 RGB	95
5.14 Área de solo exposto, imagem NDVI.....	96
5.15 Semelhança de alvos em composição 5/7 4/3 4/1 (RGB	96
5.16 Feições destacadas na composição 5/7 4/3 4/1 e NDVI em relação à composição TM 473 RGB.....	92
5.17 Discriminação de feições antrópicas na composição CP 432 RGB em relação à composição 5/7 4/3 4/1 RGB.....	100
5.18 Discriminação de diferentes cicatrizes na composição CP 321 RGB.....	100
5.19 Cicatrizes de deslizamentos identificadas na área de estudo	102
5.20 Proporção de cicatrizes por classes morfométricas	104
5.21 Proporção de cicatrizes por formas de vertente.....	106
5.22 Unidades de relevo e drenagem.....	108
5.23 Proporção de cicatrizes em cada unidade de relevo	109

5.24 Carta de área de risco	112
C 1 Carta de aspecto.....	142
C 2 Carta hipsométrica.....	143
C 3 Carta de declividade.....	144

LISTA DE TABELAS

	Pág.
2.1 TIPOS DE MOVIMENTOS DE MASSA	31
4.1 DADOS DE SENSORIAMENTO REMOTO	43
4.2 DADOS CARTOGRÁFICOS	49
4.3 LOCAIS E FEIÇÕES DE RISCO IDENTIFICADOS NO PERÍODO DE 1991 A 1996.....	51
4.4 VALORES DE ND'S DAS BANDAS DA IMAGEM TM ANTES E DEPOIS DA ATENUAÇÃO DO EFEITO DA ATMOSFERA.....	55
4.5 ESTATÍSTICA DAS IMAGENS TM 1996.....	58
4.6 MATRIZ DE VARIÂNCIA-COVARIÂNCIA - IMAGEM TM 1996	58
4.7 MATRIZ DE CORRELAÇÃO- IMAGEM TM - 1996.....	59
4.8 CLASSES DE MORFOMETRIA.....	74
5.1 MATRIZ DE AUTOVETORES IMAGEM TM 1996	98
5.2 MATRIZ DE AUTOVALORES - IMAGEM TM 1996	99
5.3 AVALIAÇÃO DAS IMAGENS TM.....	101
5.4 CARACTERÍSTICAS DAS UNIDADES DE RELEVO.....	107

CAPÍTULO 1.

INTRODUÇÃO

1.1 Justificativa

O presente trabalho foi motivado pelos problemas gerados por deslizamentos e pelas possibilidades oferecidas por dados de sensoriamento remoto, técnicas de processamento de imagens e sistemas de informações geográficas (SIG), ao estudo de variáveis relacionadas à definição de áreas de risco de ocorrência destes processos.

Os impactos causados pelos deslizamentos podem ser verificados pelos dados de destruição e mortes acarretados por eles. No Brasil foram registradas de 1988 a 1996, 835 vítimas fatais em consequência de deslizamentos (Macedo et al., 1996). As preocupações com os impactos provocados por deslizamentos motivaram a ONU a incluir os estudos desses processos na Década Internacional para a Redução de Desastres Naturais, enfatizando a necessidade de se desenvolver estratégias para a avaliação e predição de áreas susceptíveis a riscos de deslizamentos (JLS, 1988).

Visando o reconhecimento de áreas submetidas a riscos de deslizamentos, este trabalho baseou-se nas variáveis geomorfológicas, utilizando e adaptando métodos citados na bibliografia consultada. Consideraram-se as variáveis morfométricas (aspecto, declividade, amplitude de relevo, dissecação), morfográficas (formas de vertentes) e as feições do terreno relacionadas aos deslizamentos como, por exemplo, os taludes.

A importância das variáveis citadas acima em processos de deslizamentos é reconhecida por autores como Dikau (1990), Gao e Lo (1995), Walsh e Butler (1997), entre outros, que desenvolveram metodologias próprias para a análise deste tipo de processo. Estas metodologias baseiam-se nas relações entre as variáveis geomorfológicas e a ocorrência de cicatrizes de movimentos de massa, utilizando dados de sensoriamento remoto e métodos computacionais para o mapeamento e quantificação dessas relações. Outras variáveis que

influem no desenvolvimento desses processos como tipo de solo, características geológicas, climáticas, e uso/cobertura do solo também são consideradas. O uso e a importância dada a cada uma dessas variáveis está relacionado à formação do pesquisador, ao enfoque e à metodologia adotados por ele e à disponibilidade de dados.

O sensoriamento remoto orbital é uma importante técnica neste tipo de estudo, por permitir a visão sinóptica da cena imageada, o que possibilita o reconhecimento de diversos elementos da paisagem direta ou indiretamente relacionados aos movimentos de massa. As vantagens oferecidas pelos diversos tipos de sensores varia conforme a sua resolução espacial, temporal, espectral e radiométrica. Para o estudo de feições relacionadas a movimentos de massa, os dados TM Landsat (utilizados neste trabalho) podem auxiliar na detecção destas feições, desde que as dimensões destas feições sejam compatíveis com a resolução espacial deste sensor (30m X 30m). Os métodos de interpretação visual desses dados possibilitam tanto a identificação de indicadores quanto de elementos diretamente relacionados aos movimentos rápidos de massa, sendo a interpretação complementada por dados obtidos de outras fontes e por trabalho de campo. Este conjunto de dados passa a alimentar o banco de dados criado em um SIG, agilizando o armazenamento, e cruzamento destes e permitindo a geração e atualização de informações.

As possibilidades oferecidas por algoritmos existentes em SIG's permitem o cálculo de índices morfométricos e o cruzamento destes índices com outros dados que estejam relacionados a deslizamentos. Além disso, pode-se elaborar de forma automática, a partir dos dados e informações obtidas, mapas em diversas escalas.

O uso dessas técnicas em áreas propensas à ocorrência de movimentos de massa, mostra-se útil na elaboração de cartas de risco, que podem orientar o uso/ocupação do solo. A área de Caraguatatuba foi escolhida para este trabalho devido ao fato de possuir registros de deslizamentos, além de possuir potencial turístico e paisagístico, o que tem levado à sua intensa ocupação e conseqüentemente aumento de áreas expostas a riscos de deslizamentos. Outro fator que motivou a escolha desta área é a existência de trabalhos anteriores, o que

permitiu a comparação dos resultados obtidos pela utilização da metodologia aqui adotada com os resultados e dados obtidos com a aplicação de outras metodologias (Cruz, 1974; SMA, 1990; Okida, 1996).

1.2 Objetivo

Identificar áreas de risco de deslizamentos, a partir de uma abordagem geomorfológica, através do uso de dados de sensoriamento remoto (imagens TM Landsat e fotografias aéreas) e técnicas de geoprocessamento.

CAPÍTULO 2

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Movimentos de Massa

2.1.1. Introdução

A formação e dinâmica do relevo relaciona-se tanto à interação de variáveis endógenas, como o tipo e estrutura das rochas e as atividades tectônicas, quanto exógenas, como as variáveis climáticas, atuação de fauna e flora, etc. (Chorley e Kennedy, 1971; Christofolletti, 1974; Chorley et al., 1984; Marques, 1994). Como parte dessa dinâmica ocorrem os processos de vertente, entre os quais, os movimentos de massa, que envolvem o desprendimento e transporte de solo e/ou material rochoso vertente abaixo. A mobilização de material deve-se à sua condição de instabilidade, devido à atuação da gravidade, podendo ser acelerada pela ação de outros agentes, como a água. O deslocamento de material ocorre em diferentes escalas e velocidades, variando de rastejamentos a movimentos muito rápidos (Varnes, 1978; Zaruba e Mencl, 1982; Chorley et al., 1984; Hansen, 1984; IPT, 1989; Fernandes e Amaral, 1996).

Os movimentos rápidos, denominados genericamente de deslizamentos e tombamentos, têm grande importância, devido à sua interação com as atividades antrópicas e à variabilidade de causas e mecanismos (IPT, 1989; Fernandes e Amaral, 1996). Os deslizamentos e tombamentos são deflagrados pelo aumento de solicitação de mobilização de material (erosão, energia cinética da chuva, sismicidade) e pela redução da resistência do material (ação desagregadora de raízes, rastejamentos, textura e estrutura favoráveis à instabilização). Estes processos são parte da dinâmica natural da formação do modelado, mas tornam-se um problema quando encontram-se relacionados à ocupação humana, ou seja, quando há ação antrópica em áreas naturalmente potenciais à sua ocorrência, além de também serem induzidos por esta ação. Nessa perspectiva de relação entre eventos naturais

e ação antrópica, o fenômeno é enquadrado como sendo de risco, ou seja, fenômenos de origem natural ou induzidos antrópicamente e que acarretam prejuízos aos componentes do meio biofísico e social (Varnes, 1978; Cerri, 1993; Zuquette et al., 1995).

Os problemas relativos à erosão e a processos de movimentos de massa encontram-se presentes em vários lugares do mundo, mas em países cujo regime pluvial tem as características do ambiente tropical e cuja situação sócio-econômica seja considerada como de subdesenvolvimento ou em desenvolvimento, os problemas tornam-se mais acentuados devido à escassa estrutura para evitar ou controlar tal fenômeno (Guerra, 1994). O aumento de população tem levado à ocupação, tanto para a moradia (principalmente por parte de população de baixa renda) quanto para o lazer, de áreas de risco. Essa situação tem levado ao aumento de frequência (repetitividade de um fenômeno ao longo do tempo) e magnitude (extensão e impacto) dos movimentos de massa (Selby, 1982; Chorley et al., 1984, Guerra, 1994).

2.1.2. Variáveis Condicionantes de Movimentos de Massa

O estudo de movimentos de massa considera, conforme o enfoque e a disponibilidade de dados, as variáveis climáticas, geológicas, antrópicas (estas relacionadas ao uso e cobertura do solo), geotécnicas, pedológicas e geomorfológicas. Estas últimas são as que subsidiaram o trabalho aqui desenvolvido. Geralmente, parâmetros como uso/ocupação do solo, morfometria e feições geomorfológicas são considerados nestes estudos (Zuquette et al. 1995), existindo abordagens que enfatizam estas variáveis (Pike, 1988; Dikau, 1990; McKean et al., 1991; Gao e Lo, 1995; Walsh e Butler, 1997; Guimarães et al., 1998).

Deve-se salientar que as variáveis relacionadas aos processos de movimentos de massa atuam de forma interativa e, portanto, não devem ser analisadas isoladamente. A seguir é descrito o papel que cada uma exerce nos movimentos de massa.

a) Clima e Vegetação

O papel do clima relaciona-se, principalmente, à precipitação e suas conseqüências sobre os processos morfogenéticos. Nos domínios morfoclimáticos tropicais, a elevada umidade provoca o encharcamento do solo que, por sua vez, favorece os movimentos de massa. A intensidade da chuva (dada em mm/hora) relaciona-se à energia cinética desta que, por sua vez, está relacionada à erosividade (potencial que um processo tem para causar desagregação de material, como solo ou rocha, conforme Selby, 1982 e IPT, 1989) e conseqüente transporte de material. As medidas de pluviosidade (totais diários, médias mensais, etc.) fornecem uma aproximação da intensidade da chuva (Guerra, 1994). Com uma precipitação pluvial prolongada, a infiltração é contínua, o que satura o solo, reduzindo a coesão do material da vertente e a resistência desse material à erosão, devido à expansão de cisalhamento em rochas ou contato rocha-solo e de interstícios do solo, o que favorece os deslizamentos (Tricart, 1972; Whalley, 1976; Thomas, 1979; Selby, 1982; Hansen, 1984; Berger, 1996; Romanovskii et al., 1996). As variações microclimáticas, como diferenças de precipitação ao longo de uma vertente, podem determinar pontos preferenciais de ocorrência de deslizamentos.

A vegetação, de maneira geral, protege o solo de fatores que condicionam os deslizamentos, como a compactação do solo pelo impacto de gotas de chuva e conseqüente aumento de escoamento superficial, pois a cobertura vegetal intercepta as águas pluviais reduzindo a energia cinética e favorecendo a infiltração, além de certos tipos de sistemas radiculares conterem a erosividade por manterem a agregação do solo. Porém em regiões tropicais úmidas, nem sempre isso ocorre. Nos períodos de elevada pluviosidade a água das chuvas penetra entre as discontinuidades do dossel atingindo o solo, compactando-o, gerando e/ou reativando ravinas e canais de primeira ordem, o que ocorrem especialmente se não houver uma cobertura composta de flora de porte arbustivo (Tricart, 1972; Thomas, 1979; Selby, 1982; Wolle, 1988; Guerra, 1994). Esses ravinamentos e/ou canais são especialmente observados em trechos de elevadas amplitude e declividade, como na faixa

entre 35° e 40°, onde o dossel se apresenta menos contínuo, podendo sulcar cicatrizes de antigos deslizamentos e reativá-los (Strahler, 1972; Thomas, 1979; Chorley et al., 1984). Deve-se salientar que a vegetação pode atuar em alguns casos também como agente erosivo, devido à desagregação mecânica provocada por certos tipos de raízes (Chorley et al., 1984, Wolle, 1988).

b) Geologia

Com relação às condicionantes geológicas consideram-se a litologia da área e as suas características estruturais. O tipo de rocha define a permeabilização e, portanto, o tipo de drenagem e textura, além da resistência ao intemperismo. A presença de fraturas (tectônicas ou resultantes de alívio de pressão) apresentam importantes pontos de descontinuidade e menor resistência, constituindo-se em caminhos preferenciais à erosão e movimentos de massa. Muitas destas continuidades são formadas pelo alívio de pressão, encontrando-se intemperizadas, o que causa deslizamento de lajes (Wolle, 1988).

O granito (rocha de ocorrência na área de estudo, junto com o gnaisse) apresenta forte resistência ao intemperismo e baixas porosidade e permeabilidade, mas em regiões tropicais úmidas devido às características climáticas, este tipo de rocha é fortemente intemperizado, afetando preferencialmente as zonas de fragilidade, como juntas e cisalhamentos (Twidale, 1971; Twidale, 1982; Chorley et al., 1984).

c) Ação Antrópica

A ação antrópica destrutiva sobre a vegetação tem gerado e/ou acelerado processos geomorfológicos de degradação, tornando estes mais intensos que os de deposição ou se sobrepondo aos processos pedogenéticos. Isso tem ocorrido de forma intensa no sudeste brasileiro, devido tanto às atividades agrícolas quanto à urbanização, sendo que a instabilização de encostas tem sido agravada pela remoção das matas (Wolle, 1988). Sem esta interferência os processos de decomposição seriam mais rápidos que os de transporte, devido a fatores como a alta taxa de infiltração induzida pela umidade, temperatura do solo,

ação bioquímica e intenso intemperismo químico (Sternberg, 1949; Tricart, 1972; Thomas, 1979; Chorley et al., 1984). O desmatamento favorece o surgimento de áreas de escoamento devido à compactação causada pelo impacto das gotas no solo, já destacada anteriormente.

O corte de estradas e outras obras em áreas de declividade desfavorável e/ou que possuam características geológicas e geomorfológicas sujeitas a deslizamentos aceleram estes processos (Guerra, 1994; Fernandes e Amaral, 1996). Além disso, o tráfego de transporte pesado provoca vibrações que detonam processos de instabilização de encostas (Wolle, 1988; Guidicini e Nieble, 1993). O papel das atividades antrópicas como indutoras de deslizamentos é muito significativo, sendo muito freqüentes os deslizamentos em encostas ocupadas durante períodos de chuvas intensas (Hansen, 1984; Cerri, 1993). O volume de material removido e transportado por água pluvial está relacionado à densidade de cobertura vegetal e à declividade, de forma que com o desmatamento, esses processos se tornam mais intensos, principalmente em pontos de alta declividade (Strahler, 1972; Tricart, 1972, Netto, 1994).

d) Geomorfologia

As condicionantes geomorfológicas incluem as formas de vertentes e as variáveis morfométricas, como a dissecação, declividade, aspecto, amplitude de relevo, etc.

Conforme observado por Meijerink (1988), Netto (1994), IBGE (1995) e Crepani et al. (1999), a drenagem exerce papel fundamental sobre o modelamento do relevo (formas de vertentes e vales), sendo uma variável especialmente importante em regiões tropicais úmidas. A densidade de drenagem fornece a intensidade da dissecação do relevo e é expressa por:

$$Dd = \frac{\sum L}{A} \quad (2.1)$$

onde:

Dd é a densidade drenagem

ΣL é a somatória dos comprimentos dos canais

A é a área drenada.

Autores como Linsley et al. (1949), Chorley et al. (1984) e Clowes e Comfort (1986) consideram na equação 2.1 tanto os canais perenes quanto os ravinamentos. Esta abordagem é adequada ao estudo de movimentos de massa, pois os ravinamentos estão fortemente relacionados a estes processos, principalmente nas regiões tropicais úmidas, onde a elevada precipitação leva ao aumento de frequência de canais de primeira ordem e de ravinas e, conseqüentemente, o comprimento desses tem que ser considerado no cômputo de ΣL (Tricart, 1972; Thomas, 1979; Chorley et al., 1984).

A declividade fornece a medida de inclinação (em graus ou percentual) do relevo em relação ao plano do horizonte. A velocidade de deslocamento de material e, portanto, a capacidade de transporte de massas sólidas e líquidas, é diretamente proporcional à declividade. Esta variável tem grande importância nos processos geomorfológicos, condicionando cursos de água e deslocamento de colúvio (Christofolletti, 1974; Clark e Small, 1982; Tarboton et al., 1991; Crepani et al., 1999; Nogami, 1998). Há relação direta entre a erosividade do canal e a declividade. Canais perenes ou temporários encaixados próximos às cabeceiras apresentam maior erosividade, devido à elevada declividade e alto gradiente de energia, como citado por Thomas (1979); Christofolletti (1981) e IPT (1989). Assim, pode-se deduzir que regiões fortemente dissecadas (ou seja, com alta densidade de drenagem) e alta declividade apresentam maior número de pontos favoráveis a riscos de escorregamentos, como já indicado por Tuttle (1970), Tricart (1972) e Thomas (1979).

As declividades acima de 30° apresentam risco de deslizamentos mais freqüente. Acima de 60° o regolito é menos espesso e, teoricamente, diminuiria o risco de escorregamentos, mas

fenômenos desse tipo já foram verificados em áreas cujo manto de regolito era pouco espesso (SMA, 1990), principalmente ao redor de cabeceiras de drenagem e em épocas de pluviosidade elevada, tornando exposta a rocha de base (Tricart, 1972; Thomas, 1979; IPT, 1989; Fernandes e Amaral, 1996).

A variação de exposição à pluviosidade, insolação e ventos de uma vertente está relacionada à sua orientação (aspecto), o que causa diferenças na umidade retida na vertente e, portanto, na umidade do solo. Vertentes que retêm mais umidade, estão, em geral, opostas à insolação ou voltadas para a umidade transportada por ventos ou por pluviosidade. O azimute também pode estar relacionado ao mergulho das camadas geológicas, já que, caso essas sejam concordantes ao caimento da vertente mostram-se favoráveis a escorregamentos (Sternberg, 1949; Chorley et al., 1984; McKean et al., 1991; Gao e Lo, 1995, Patton, 1988)

A amplitude de relevo refere-se à variação de altura, em metros, dada pela diferença entre as cotas máxima e mínima. Quando esta variação tem como cota mínima o nível de base geral, tem-se a altitude. O fatiamento da altitude em intervalos de classe e sua representação por cores fornece a hipsometria (Ferreira, 1995; Guerra e Guerra, 1997). A amplitude está relacionada ao encaixamento dos vales. Quanto mais elevado o valor da amplitude, maior a energia cinética aplicada às vertentes e, conseqüentemente, maior é a capacidade de deslocamento de material, principalmente se associada a elevadas declividades e dissecação (Tuttle, 1970; Tricart, 1972; Christofolletti, 1974; Thomas, 1979; Crepani et al., 1999).

Com relação à forma das vertentes, existem três tipos básicos: as formas côncavas, convexas e retilíneas. Estas formas encontram-se combinadas na natureza, gerando os demais tipos (côncavo-convexas, retilínea-convexas, etc.), como pode ser observado na Figura 2.1.

As vertentes que apresentam configuração côncava ou que possuem segmentos côncavos em sua seção (*hollows*) por serem zonas de convergência de fluxo de água e por possuírem

material disponível para a mobilização (pois tem maior volume de material depositado, como colúvio ou tálus) são as mais favoráveis à ocorrência de deslizamentos (Sternberg, 1949; Clark e Small, 1982; Selby, 1982; Dikau, 1990; McKean et al., 1991; Fernandes e Amaral, 1996). As caneluras (*lapiés*) e *hollows* originados pela elevada umidade dos domínios tropicais tornam-se zonas de fragilidade e oferecem propensão a deslocamento de blocos (Tricart, 1972; Selby, 1982; Twidale, 1982; Chorley et al., 1984; Fernandes e Amaral, 1996). Assim, tanto a forma quanto o declive dos segmentos das vertentes, aliados

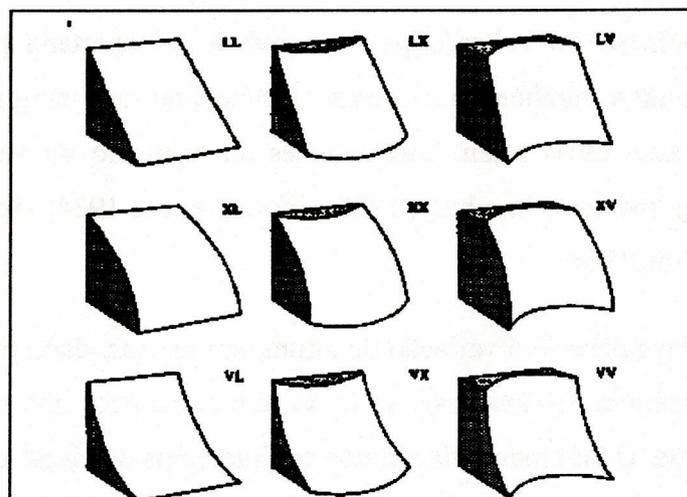


Fig. 2.1 - Formas de vertentes: LL – retilínea, LX – convexo - retilínea, LV – côncavo - retilíneo, XL – retilíneo - convexo, XX – convexo, XV – côncavo-convexo, VL – retilíneo - côncavo, VX – convexo - côncavo, VV – côncavo
 FONTE: Adaptada de Chorley et al. (1984, p.168).

às demais variáveis citadas, determinam a ocorrência do tipo de processo, como ilustra a Figura 2.2 (Chorley e Kennedy, 1971; Christofolletti, 1974; Clark e Small, 1982).

Ainda com relação ao relevo, sob clima úmido, as rochas cristalinas (especialmente granito e gnaisses) geram morros de vertentes predominantemente convexas, conhecidas como meias laranjas com espesso manto de regolito resultante do intenso intemperismo químico. Em setores onde se tem forte controle estrutural (como é o caso dos setores enfatizados na área de estudo), encontram-se formas mais verticalizadas, como espigões e serras, com presença

de anfiteatros e vertentes côncavas. Estas formas apresentam-se escarpadas com elevados valores hipsométricos (e de amplitude altimétrica), vertentes longas e com altas declividades (Ab'Saber, 1966; Tricart, 1972; Thomas, 1979; Chorley et al., 1984). A intensa pluviosidade (uma das características de terrenos montanhosos tropicais, como ocorre no Brasil), faz com que estes tipos de terreno sejam bastante propícios a deslizamentos. (Tricart, 1972; Thomas, 1979; Chorley et al., 1984; Pike, 1988; Gonzales et al., 1995; Fernandes e Amaral, 1996).

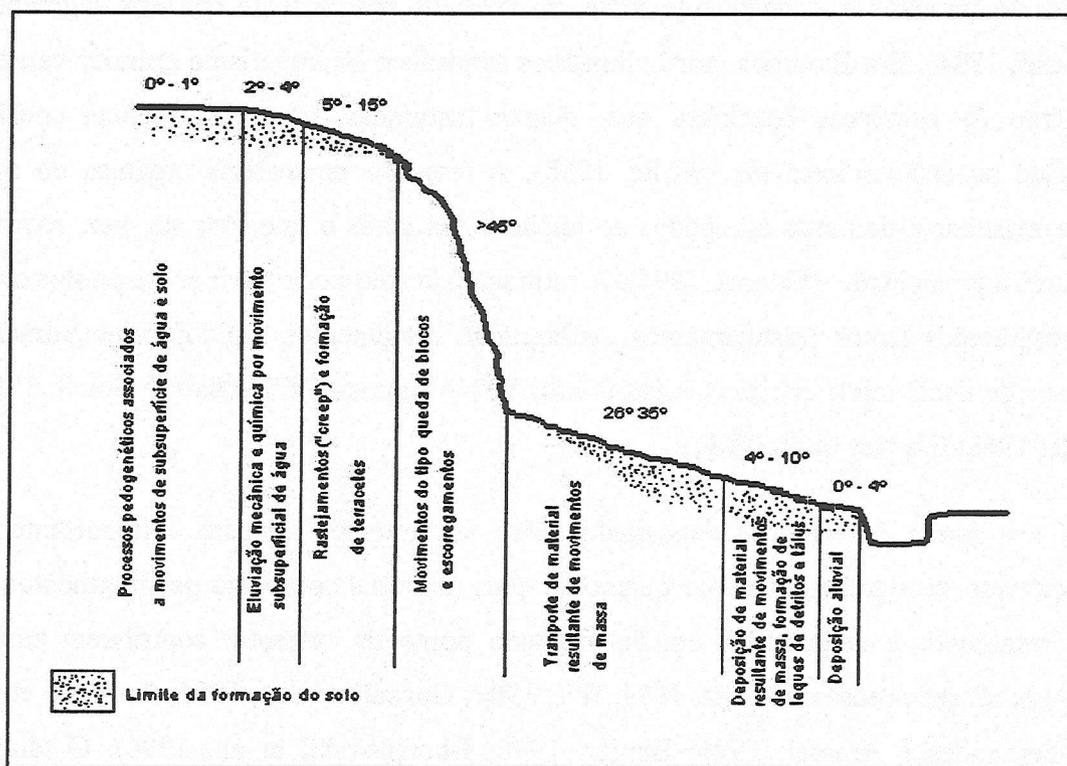


Fig 2.2 - Processos geomorfológicos dominantes em uma vertente.
 FONTE: Modificada de: Clark e Small (1982, p. 71)

As características do regolito também são importantes no condicionamento de deslizamentos. Os regolitos com alto percentual de argila favorecem a retenção de umidade, o que provoca a sua saturação e impermeabilização, causando o encharcamento e conseqüente escoamento superficial. Além disto, a argila tem grande propensão à

liquefação - passagem do estado sólido para o viscoso, conforme adição de água (IPT, 1989). No caso de granitos e gnaisses (litologia que compõe a área de estudo enfocada neste trabalho) o intemperismo afeta minerais alcalinos (K, Ca, Mg) o que provoca a dissolução de bases e neutraliza a acidez da água subterrânea, causando a formação de montmorilonita. Esta tem seu volume expandido devido à umidade, o que provoca abertura de fendas, etc., tornando mais instáveis as vertentes (Tricart, 1972; Thomas, 1979; Chorley et al., 1984). Deve-se lembrar que a forma e o aspecto (azimute) da vertente condicionam variações na umidade e, conseqüentemente, no valor do pH presente em seus segmentos (Birkeland, 1984). Em domínios morfoclimáticos tropicais o intemperismo químico causa o surgimento de carapaças lateríticas que, quando saturadas, apresentam baixa coesão, originando superfícies instáveis (Wolle, 1988). A remoção de matéria orgânica do solo reduz a resistência dos seus agregados ao impacto das gotas o que, por sua vez, reduz a resistência à erosividade. (Guerra, 1994). A saturação do solo pode atuar sobre pontos onde haja movimentos lentos (rastejamento), deflagrando movimentos rápidos principalmente em faixas de declividade crítica (Christofoletti, 1974; Thomas 1979; Clark e Small, 1982; Twidale, 1982; Chorley et al., 1984).

O tipo e a forma de material depositado sobre as vertentes também é importante. A presença tanto de regolitos espessos quanto de tálus (material composto por fragmentos de rochas removidos e depositados em determinado ponto da vertente) contribuem para a ocorrência desses processos (Cruz, 1974; IPT, 1989; Gonzalez et al., 1995; Zuquette et al., 1995; Fernandes e Amaral, 1996; Berger, 1996; Romanovskii et al., 1996). O tálus é resultante de movimentos de massa pretéritos e serve de fonte para novos movimentos de massa, ao sair de uma situação de estabilidade, principalmente em períodos de elevada pluviosidade, onde tem-se o rompimento desses depósitos (Tuttle, 1970; Cruz, 1974; Chorley et al.; 1984; IPT, 1989; Berger, 1996; Romanovskii, 1996). Além da ação da pluviosidade, esses depósitos podem ser instabilizados por termoclastia ou por solapamento da base, devido à erosão fluvial (Hansen, 1984; Wolle, 1988, Guidicini e Nieble, 1993).

A interação das variáveis citadas torna possível a indicação de quais os sítios mais propensos à ocorrência desses processos. Como exemplo, há o trabalho de Sternberg (1949) sobre as conseqüências da ação antrópica em áreas inadequadas, favorecendo movimentos de massa no Vale do Paraíba. Embora o aspecto climático tenha colaborado (devido à concentração de pluviosidade decorrente de uma frente fria estacionária) o autor observa que a remoção de cobertura vegetal em áreas instáveis e cultivo em áreas expostas às torrentes e em classes de declive impróprias foram os principais fatores para a elevada magnitude e impacto dos processos ocorridos, aliados ao esgotamento do solo, provocado pelo cultivo de café, que retira colóides orgânicos (responsáveis pela manutenção da estrutura do solo e pela resistência à erosividade). Com relação ao aspecto (azimute) das vertentes, a erosão foi mais intensa naquelas que possuíam flancos com orientação concordante ao mergulho das camadas. O autor chama a atenção para a influência do microclima, cujas variações estão relacionadas tanto à orientação das vertentes como às suas variações topográficas. A influência da fauna é também citada, considerando que formigueiros construídos por saúvas induzem a movimentos de partículas do solo. O autor constatou ainda a presença de erosão sobre cicatrizes de antigos escorregamentos.

2.1.3. Classificação de Movimentos de Massa

São apresentadas várias classificações para os fenômenos de movimentos de massa, variando o detalhamento em relação à distinção entre os tipos existentes. A classificação, conforme IPT, 1989, deve atender não só a finalidades científicas mas práticas também como, por exemplo, determinar áreas de risco a fim de auxiliar planos de defesa civil. Segundo Chorley et al. (1984) e como ilustrado na Figura 2.3, os movimentos de massa podem ser classificados de acordo com a direção em:

- ✓ Diagonais: movimentos semelhantes aos laterais (citados abaixo), mas com maior participação da força gravitacional, pois ocorrem independente de zonas de contato entre materiais e de lubrificação. Tem-se nesta categoria movimentos lentos

(rastejamentos da porção superior do manto de regolito) e movimentos de maior velocidade. É observado por inclinação de árvores e postes, por exemplo.

- ✓ Laterais: originados por lubrificação de zonas de contato solo/rocha ou material plástico depositados sobre material não plástico. A situação de alta viscosidade⁽¹⁾ leva a uma menor mobilidade do material transportado. Assim como a queda de blocos, são movimentos rápidos.

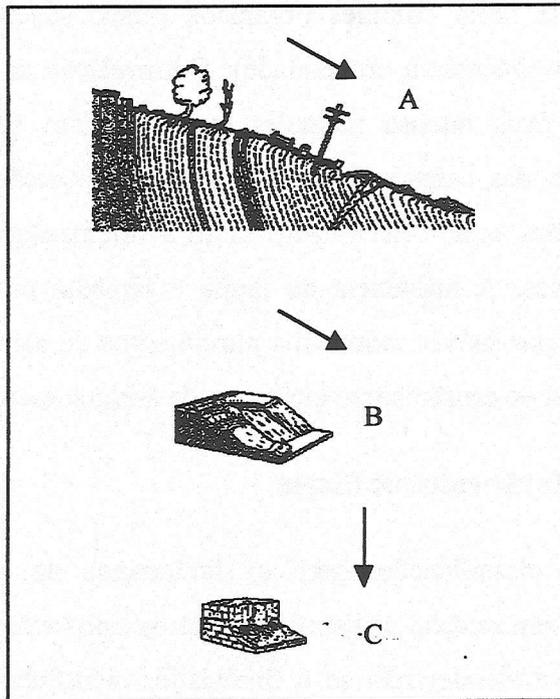


Fig. 2.3 - Tipos movimentos de massa: A – diagonais (rastejamento), B – laterais (deslizamento), C – verticais (queda de blocos). As setas indicam a direção dos movimentos

FONTE: Adaptada de Chorley et al (1984, p. 236); Christofolletti (1974, p.28).

(1) Viscosidade é definida como a resistência oferecida por uma substância à solicitação de movimento (IPT, 1989)

- ✓ Verticais: queda de blocos devido a ação da gravidade. Ausência de agente mobilizador. São movimentos rápidos.

As classificações mais detalhadas, segundo Selby (1982), Chorley et al. (1984), IPT (1989) e Augusto Filho (1994), consideram a cinemática do movimento (relação entre massa de material mobilizado e material estável, velocidade e direção de deslocamento), tipo de material (estrutura, textura e conteúdo de água) e geometria (tamanho e forma de material mobilizado). A Tabela 2.1 mostra uma classificação dos tipos de movimentos de massa, considerando essas características e a direção de movimentos.

TABELA 2.1 TIPOS DE MOVIMENTOS DE MASSA

Tipo de movimento	Características do movimento
Rastejos (<i>creep</i>)	Movimento lento, ocorre em declives acima de 35°, deslocando porção superior do solo, atingindo baixa profundidade. Possui gradiente vertical de velocidade (maior próximo à superfície, diminuindo com a profundidade).
Escorregamentos (<i>slide</i>)	Deslizamentos Envolvem participação da água. Ocorre em relevos de elevada amplitude, com presença de manto de regolito. Causado por elevada pluviosidade e antropismo. Envolve fragmentos de rochas (<i>rockslide</i>) e solos (<i>landslides</i>)
Corridas de massa (<i>flow</i>)	
Queda de blocos (<i>fall</i>)	Movimentos desenvolvidos em declives com ângulos próximos a 90°. Queda livre de material (rochas, solos). Ação maior da gravidade, sem água como agente mobilizador.

FONTE: Adaptada de Chorley et al. (1984), IPT (1989), Fernandes e Amaral (1996)

Com relação aos escorregamentos e corridas de massa, há dificuldade na separação destes dois tipos de movimento através de dados de sensoriamento remoto, pois ambos produzem cicatrizes com características semelhantes (IPT, 1989; Fernandes, 1996; Okida, 1996). Os escorregamentos podem ser classificados, de acordo com Chorley et al. (1984), Wolle (1988), Cerri (1993), Guidicini e Nieble (1993), Augusto Filho (1994), Macedo et al. (1998) em planar, rotacional e em cunha.

- ✓ Planar: ocorrem em áreas de elevada declividade onde o solo é pouco espesso, ou na porção em que o solo coluvionar intercepta o saprólito ou ainda junto a planos de fraqueza (falhas, xistosidades, etc); possuem comprimento maior que a largura. Este tipo de deslizamento é muito frequente na Serra do Mar, estando fortemente associado à saturação do solo devido à infiltração de águas pluviais.
- ✓ Rotacional: ocorrem em áreas com superfícies curvas, formadas por material deposicional de grande espessura ou por rochas muito fraturadas, localizadas em topos de escarpas ou de morros ou em vertentes suaves.
- ✓ Cunha: este tipo de escorregamento tem sua ocorrência associada à saprólitos e a maciços, apresentando dois planos de fraqueza, sendo que o deslocamento ocorre ao longo do eixo de intercessão desses planos.

O escorregamento é um movimento envolvendo material sólido (solo e/ou rocha) que ocorre ao longo de uma superfície de cisalhamento, apresentando uma fricção constante. A corrida de massa, devido à maior participação da água, possui menor viscosidade e maior mobilidade que o escorregamento e apresenta vários planos de cisalhamento. Possui gradiente vertical de velocidade, decrescendo esta com a profundidade, o que produz diferenciais de deslocamentos internos na massa e sua deformação (IPT, 1989).

Os movimentos de queda livre independem de precipitação pluvial, já para os escorregamentos e corrida de massa essa variável é importante, uma vez que a umidade

e/ou encharcamento do solo deflagram a desagregação e transporte desse material. Estes processos requerem um certo volume de material a ser mobilizado, proveniente de depósitos coluviais e tálus.

Em relevos modelados sobre granito, é freqüente a ocorrência de blocos soltos (conhecidos por *boulders*) formados a partir do alargamento de brechas geradas por diáclases, devido ao alívio de pressão proporcionado pelo intemperismo. Esses blocos podem, dependendo de sua posição topográfica, gerarem movimentos do tipo queda livre (Twidale, 1971 e 1982).

O escorregamento deposita o material mobilizado no sopé da vertente, sendo este depósito, geralmente, de comprimento duas vezes maior que o comprimento da cicatriz (área de remoção do material), enquanto em movimentos do tipo corrida de massa o material se desloca para além do sopé. Ambos possuem uma geometria definida (Figura 2.4), formada pela cabeceira (onde se inicia o escorregamento), pelo corpo (ao longo da faixa afetada pela remoção e transporte de material) e pela base (onde se deposita o material transportado) (Zaruba e Mencl, 1982; Hansen, 1984; IPT, 1989). Estes tipos de processos se desenvolvem

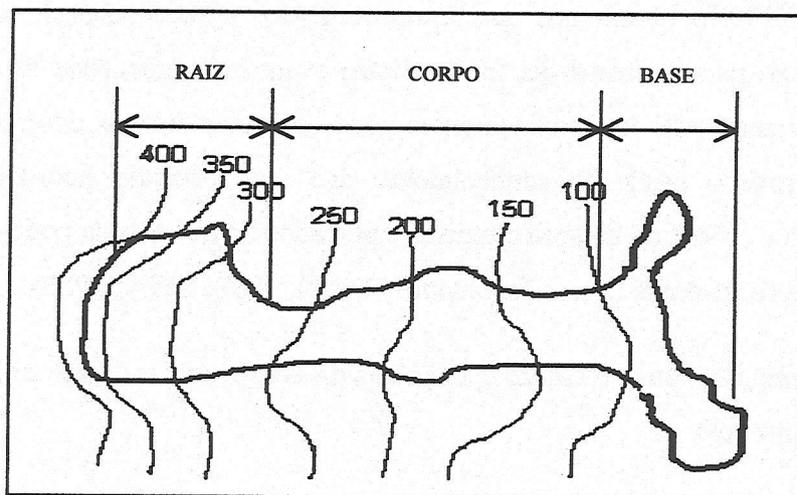


Fig 2.4 - Esquema dos componentes de um deslizamento (linha espessa) superposto às curvas de nível.

FONTE: Modificado de Zaruba e Mencl (1982, p. 81)

ao longo dos cursos de drenagem e sobre as encostas, transportando carga proveniente de material erodido nos canais de drenagem e também de escorregamentos adjacentes a esses canais (terraços, tálus e colúvio). É freqüente originarem-se em cabeceiras de drenagem situadas em declives maiores que 15°, formando, a jusante, cone de detritos. O material resultante é mal selecionado, composto por uma matriz de areia, argila ou silte na qual se encontra população de maior granulometria. Os vales fortemente encaixados são os mais propensos a servirem de vias para o fluxo e acúmulo desse material. Os escorregamentos e corridas de massa são tipos de movimento muito observados no Brasil (Thomas, 1979; Zaruba e Mencl, 1982; IPT, 1989).

Em regolitos originados a partir de rochas granitóides movimentos do tipo escorregamento tem ocorrência na base do subsolo, onde é mais arenoso e permeável, assim o contato entre solo e rocha favorece esse processo. Com elevada pluviosidade mesmo as áreas de contato muito gradual entre rocha e demais estratos são afetadas (SMA, 1990).

A relação entre deslizamentos (representados por suas cicatrizes) e as variáveis morfológicas são demonstradas por Dikau (1990), McKean et al. (1991), Gao e Lo (1995), Guimarães et al. (1998). Locais que apresentam registros antecedentes de deslizamentos são áreas potenciais para a ocorrência futura destes eventos. Conhecendo-se a freqüência, características e magnitude dos deslizamentos pode-se prever futuras ocorrências (Selby, 1982). Dessa forma, a partir do conhecimento das características geomorfológicas da paisagem, seu uso e cobertura do solo e registros passados de ocorrência pode-se considerar a possibilidade de recorrência desses fenômenos (Dikau, 1990; Selby, 1982).

2.2. Dados de Sensoriamento Remoto e Técnicas de Geoprocessamento no Estudo de Risco de Deslizamentos

Vários trabalhos para a detecção de deslizamentos utilizam fotografias aéreas (Gao e Lo, 1995; Patton, 1988; Dikau, 1990), devido à resolução espacial mais fina, mas há trabalhos realizados com a utilização de dados de sensores orbitais. As características de resolução

(espacial, temporal, espectral e radiométrica) dos sistemas sensores orbitais, bem como o caráter sinóptico dos dados obtidos por esses sistemas permitem observar as feições da paisagem relacionadas aos processos de movimentos de massa (King e Delpont, 1993; Walsh et al., 1998).

Dados de sensoriamento remoto orbital podem ser utilizados para estudos de movimentos de massa tanto na detecção direta das conseqüências destes processos (cicatrizes devido a remoção da cobertura vegetal e exposição de camadas subsuperficiais do solo e deposição de material transportado formando leques de detritos) como através da identificação de indicadores. Estes indicadores referem-se às mudanças na resposta da cobertura vegetal, devido a escorregamentos anteriores (diferença na densidade e tipo de vegetação), uso da terra (cortes de estradas ou remoção de vegetação por ação antrópica em áreas propícias a deslizamentos) morfologia (formas de vertentes) e dissecação do relevo (King e Delpont, 1993; Romanovskii et al., 1996). A remoção de cobertura vegetal e das camadas superficiais do solo por processos naturais ou ação antrópica resultam em mudanças nas características espectrais da superfície, que são detectadas por sistemas sensores.

Os elementos indiretos também fornecem informação para o zoneamento de locais susceptíveis a deslizamentos. Okida (1996) realizou o zoneamento e mapeamento de áreas de risco para o município de Caraguatatuba, São Paulo, a partir da interpretação de dados TM Landsat, os quais permitiram a extração de informações relacionadas a riscos de deslizamentos, como traços de fraturas, lineamentos estruturais, unidades de relevo, etc. Foi constatado em seu trabalho, que os deslizamentos são condicionados principalmente por falhas e fraturas, sendo deflagrados pela pluviosidade. Associado a estes fatores, tem-se as características geomorfológicas (declividade e formas de vertentes) e a remoção de cobertura vegetal, o que favorece a ocorrência de deslizamentos.

As diferenças de comportamento espectral entre o solo, feições antrópicas e a vegetação e dentro da própria vegetação (tipo e porte desta) são observadas nas bandas do visível e do infravermelho do TM. Diferenças na cena imageada devido à retomada da vegetação em

cicatrices de deslizamentos podem ser detectadas pelos sensores. Assim, processamentos como, por exemplo, razão entre bandas e Transformação por Componentes Principais destacam essas diferenças e servem como indicadores de processos geomorfológicos e informam sobre características de ocupação do solo. (Drury, 1993; Walsh et al., 1998).

No caso de deslizamentos tem-se a remoção da cobertura vegetal e conseqüente exposição do solo ou rocha e deposição de material transportado ao longo da vertente à jusante. Estas características imprimem diferenças de tonalidade, cor, matiz e textura na cena imageada, além de apresentarem formas específicas, o que permite a interpretação direta destas feições (McKean et al., 1991; Gao e Lo, 1995). Já as características topográficas e morfológicas (depressões provocadas por estes eventos ou drenagem pouco espaçada) e da cobertura vegetal (inclinação ou remoção de árvores, provocando diferenças de textura na imagem devido à variação abrupta de tonalidade), sugerem a ocorrência desses processos na cena imageada. As variações na textura da vegetação são melhor percebidas em dados de sensores com resolução espacial mais fina, como fotografias aéreas (McKean et al., 1991; Augusto Filho, 1994; Belsher, 1997; Walsh e Butler, 1997).

As formas das cicatrizes geradas por deslizamentos são geralmente elípticas ou cônicas e, quando recentes, observa-se a cabeceira ou raiz (onde o material é removido, expondo o solo ou rocha), o corpo (porção ao longo da qual o material é transportado) e a base, onde há depósito do material removido (Zaruba e Mencl, 1982; Hansen, 1984; Patton, 1988; IPT, 1989; Soares e Fiori, 1976). Essas cicatrizes se desenvolvem, geralmente, em setores côncavos das vertentes, ao longo de linhas de drenagem ou em torno de alterações antrópicas (estradas, por exemplo), estendendo-se sobre alta ou média vertente (em declives maiores que 20°) e depositando o material removido em pontos de baixa vertente e vales, onde há, por conseqüência, formação de tálus e/ou leques de deposição, alterando a topografia (Zaruba e Mencl, 1982; Patton, 1988; Gao e Lo, 1995; Fernandes e Amaral, 1996). Dessa forma, através da interpretação de elementos diretos e indiretos pode-se mapear pontos de um terreno mais susceptíveis a deslizamentos.

Entretanto, Mcdermid e Franklin (1994) chamam a atenção para a limitação de dados TM Landsat, devido à semelhança de forma e de resposta espectral, existente entre certas feições relacionadas ao uso do solo com as resultantes de processos naturais. A interpretação pode ser prejudicada tanto pela maneira como se organiza o fenômeno (a forma e padrão de alguns fenômenos distintos podem ser semelhantes) como pela existência de obstáculos à detecção desse fenômeno, devido à resolução espacial do sensor ou semelhança de comportamento espectral entre objetos diferentes. Como nem sempre os processamentos de imagens permitem distinguir nitidamente as diferenças entre formas resultantes de causas distintas, o uso de dados obtidos a partir do Modelo Numérico de Terreno (MNT) leva a uma abordagem mais segura, pois fornecem detalhes da topografia (McDermid e Franklin, 1994).

O MNT é um recurso oferecido pelos SIG's que permite a modelagem do espaço terrestre e a extração de variáveis morfométricas que fornecem a assinatura geométrica do terreno e são de importância para estudos sobre risco de deslizamentos, como declividade, amplitude de relevo e aspecto (Pike, 1988; Gardner et al., 1989; McDermid e Franklin, 1994). Algoritmos têm sido desenvolvidos também para a geração de grades para formas de vertentes e densidade de drenagem (O'Callaghan e Mark, 1984; Tarboton et al., 1991; Weibel e Heller, 1994; Burroughs e McDonell, 1998).

O cruzamento de dados extraídos de MNT com os dados extraídos de imagens, fotografias aéreas, mapas e trabalho de campo geram informação sobre quais as características e tipos de alterações que se observam em um determinado tipo de terreno, como a ocorrência de feições antrópicas e de cicatrizes nos intervalos de classe de declividade, aspecto (azimute) e altimetria (Dikau, 1990; Gao e Lo, 1995; Walsh e Butler, 1997; Guimarães et al., 1998). Esse cruzamento permite também a geração de mapas indicadores de riscos, os quais servem de orientação para o uso e a ocupação do solo (Bocco e Valenzuela, 1993; King e Delpont, 1993; Nogami, 1998; Burroughs e McDonell, 1998).

Os dados de sensoriamento remoto podem, após tratamentos adequados por meio de processamentos digitais, ser integrados entre si e/ou com dados obtidos de outras fontes por meio do SIG, o que permite avaliar, segundo Walsh et al. (1998):

- ✓ a composição da paisagem dentro de uma unidade espacial definida (um pixel ou uma unidade geomorfológica, por exemplo).
- ✓ as correlações espaciais entre as variáveis presentes em uma paisagem.
- ✓ os padrões existentes nessas variáveis, o que permite observar a organização destas na paisagem.

A partir do cruzamento dos dados referentes às variáveis envolvidas nos processos de deslizamentos é possível realizar-se a previsão espacial da ocorrência destes em várias escalas e identificar quais as áreas propensas a eventos deste tipo (Augusto Filho, 1993).

Exemplos de trabalhos onde realizou-se o cruzamento de mapas de cicatrizes de deslizamentos com parâmetros morfométricos e mapa de unidade de relevo podem ser verificados em Gao e Lo (1995), Walsh e Butler (1997), Walsh et al. (1998). González et al. (1995) mapearam áreas propensas a movimentos de massa utilizando SIG. Estes autores cruzaram mapas de litologia, uso/ocupação do solo e variáveis morfométricas, identificando quais as variáveis que mais contribuíram para a ocorrência de movimentos de massa.

Walsh e Butler (1997) mapearam escorregamentos através de dados TM Landsat e de fotografias aéreas, gerando um plano digital, a partir da interpretação desses dados, que foi cruzado posteriormente com as derivadas extraídas do MNT (aspecto e declividade) e com mapas de ocupação do solo. A partir desse cruzamento foi gerado um mapa de graus de riscos de escorregamento. Procedimentos semelhantes foram realizados também por Dikau (1990), McKean et al. (1991), Gao e Lo (1995), e Guimarães et al. (1998). Estes autores calcularam a proporção de áreas afetadas por deslizamentos segundo intervalos de classes de aspecto, declividade e hipsometria. No caso de Gao e Lo (1995) também foi verificada a

relação das cicatrizes de deslizamentos com as formas de vertentes. Através de uso de SIG verificou-se a proporção de áreas afetadas por deslizamentos para as classes de cada variável e verificou-se a relação entre ambas, utilizando também dados referentes ao tipo de ocupação do solo. Augusto Filho (1993) elaborou, também com auxílio de um SIG, uma carta de risco de escorregamentos definindo os graus de susceptibilidade tendo a declividade como parâmetro básico.

CAPÍTULO 3

ÁREA DE ESTUDO

3.1 Localização

A área de estudo localiza-se no município de Caraguatatuba, Estado de São Paulo, entre as coordenadas 23° 37' 55" - 23° 44' 50" lat S e 45° 23' 50" - 45° 33' 55" long W (coordenadas UTM: 7374008 - 7398000 e 441960 - 464000) e pode ser observada na Figura 3.1.

3.2 Caracterização

Na área de estudo ocorrem três compartimentos geomorfológicos básicos: um formado por escarpas e rampas de aplainamento, com vários níveis altimétricos, um composto por morros e colinas de baixa amplitude situados no planalto e outro formado pela baixada litorânea. Esta última é descontínua, com pequenas enseadas e praias. A faixa de transição entre patamares intermediários e a planície é composta por baixos níveis altimétricos. A área apresenta forte controle estrutural, possuindo escarpas, cristas e esporões. Conforme Almeida (1964), a Serra do Mar é formada por uma escarpa erosiva, onde se encontram vertentes de forte declive cujos ravinamentos formam espigões que, à medida que avançam para o mar, tornam-se suavizados.

Este trabalho enfoca a compartimentação de relevo escarpado e com elevada dissecação. Na porção NW-NE há anfiteatros divididos por espigões com declives abruptos. As vertentes apresentam-se côncavas e com topos angulosos e vales bem encaixados. A NE, na porção central e a SW e a S ocorrem escarpas em espigões com topos angulosos ou arredondados e vertentes com perfis predominantemente convexos ou retilíneos. Os vales existentes nesta área são bem encaixados (Florenzano, 1993, Florenzano e Csordas, 1993).

O forte intemperismo causado pela umidade do clima desta área é gerador de intensos processos morfogenéticos, entre os quais, os movimentos de massa (Almeida, 1964;

Ab'Sáber, 1966; Cruz, 1974; Projeto RADAMBRASIL, 1983). Em termos geológicos, a área está inserida na região de Dobramentos Sudeste, sendo formada por falhas

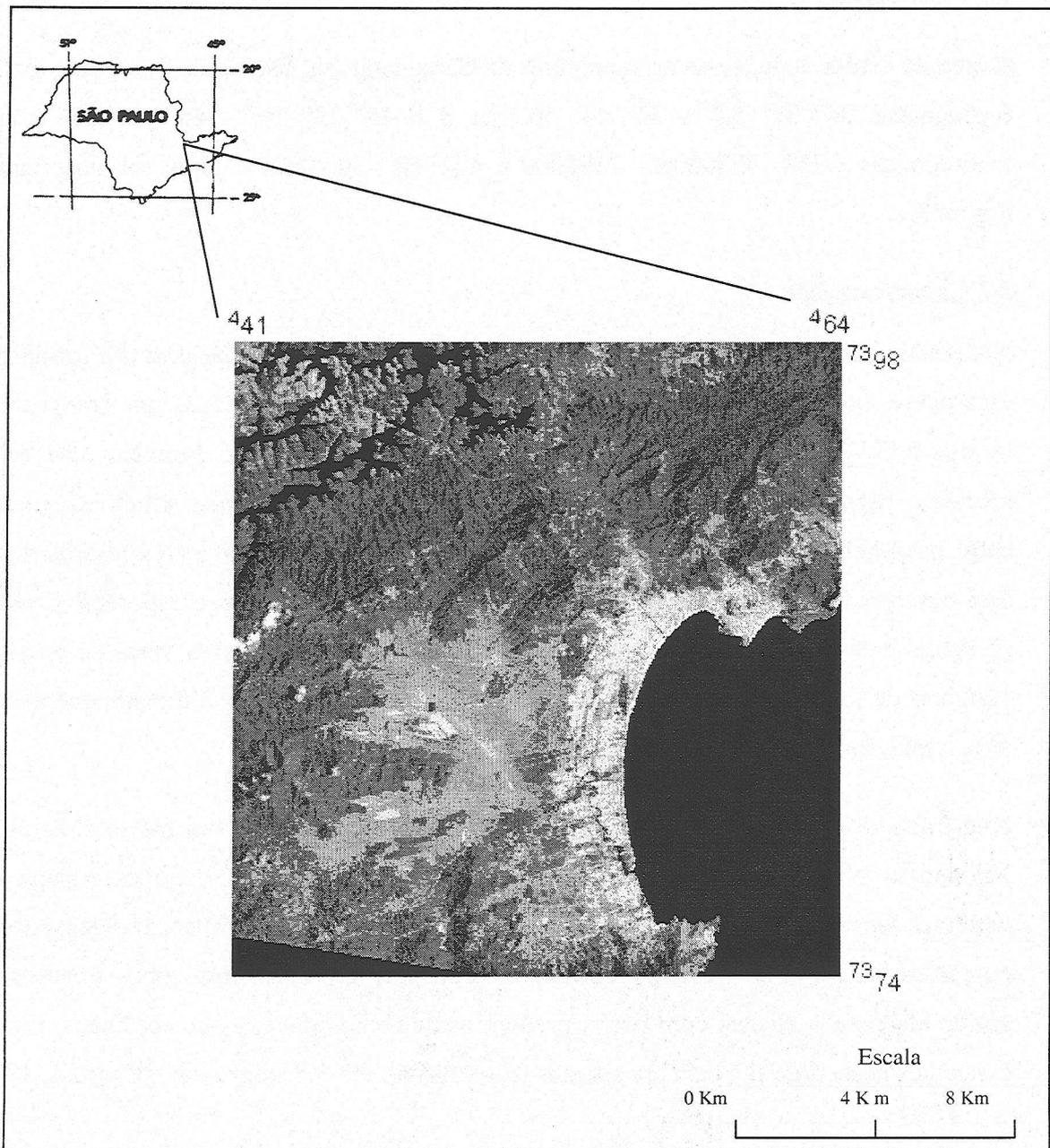


Fig 3.1 Localização da área de estudo (TM, 1996).

transcorrentes e apresentando estruturas disjuntivas. Estruturalmente, a área da serra é dominada por fraturas distribuídas predominantemente na direção E-W (Okida, 1996). A litologia é composta por rochas arqueanas do Complexo Paraíba do Sul, principalmente gnaisses e migmatitos. O granito gnaissoso ocorre na área, apresentando granulação fina a média, sendo este atingido por forte intemperismo (Almeida, 1964; Cruz, 1974; Projeto RADAMBRASIL, 1983).

Em relação aos solos, na área estudada ocorrem, nas porções planas, a classe Podzólico Vermelho-Amarelo Latossólico distrófico hidromórfico, com textura arenosa. Já as porções de relevo fortemente ondulado (como na serra) se constituem de cambissolos álicos com horizonte A moderado e de textura argilosa. Ocorre também nestas porções Latossolo Vermelho e Amarelo álico, de textura argilosa com horizonte A moderado, apresentando a fase pedregosa (Projeto RADAMBRASIL, 1983).

A vegetação que recobre a serra e a faixa de transição planície litorânea-serra é formada pelos elementos da Mata Atlântica (floresta ombrófila densa submontana e montana), com três formações: mata de planície litorânea, mata de encosta e mata de altitude (que ocorre acima de 1100m). Essas formações possuem árvores de médio a grande porte. Além da mata verifica-se alta taxa de ocorrência de capoeira (Projeto RADAMBRASIL, 1983; IBGE, 1988; Kurkdjian et al, 1992).

O clima é caracterizado como tropical quente superúmido, com temperaturas médias anuais de 18 a 20° C e precipitação média anual em torno de 1200 a 2500 mm. A radiação solar e a existência de superfícies líquidas consideráveis (Oceano Atlântico) geram ótimas condições de evaporação o que resulta na significativa precipitação registrada na área (Setzer, 1966; Nimer, 1979). O efeito orográfico representado pela brusca variação altimétrica e presença de vales fortemente encaixados reforçam a pluviosidade. A disposição da Serra do Mar em relação ao Oceano é paralela e, portanto, oferece menos oposição ao contato com frentes, o que reduziria a pluviosidade. Porém, as elevadas variações altimétricas presentes na serra e

esporões reforçam a condensação e, portanto, favorecem a pluviosidade (Nunes e Modesto, 1992).

Os processos morfogenéticos (especificamente movimentos de massa) atuantes resultam, principalmente, das características geomorfológicas (elevadas declividades e dissecação, vertentes de forma côncavas ou com concavidade associada, etc) com a colaboração da atividade antrópica. Nas encostas (principalmente as desprotegidas) há ocorrência de processos originados a partir de desagregação mecânica e intemperismo químico, conferindo uma dinâmica instável às vertentes. Mesmo possuindo densa cobertura vegetal as declividades fortes estimulam deslizamentos e quedas de blocos (Projeto RADAMBRASIL, 1983). A alta pluviosidade aliada à remoção de cobertura vegetal da área e as demais características citadas acima é o principal agente detonador de movimentos de massa (Cruz, 1974; Okida, 1996).

Os escorregamentos são observados nas áreas de maior energia do relevo (pontos de alta declividade, escarpas, vertentes côncavas), e se desenvolvem a partir de processos morfodinâmicos pré-existentes (como creep) ou feições erosivas (devido à ocupação e uso de áreas inadequadas). Os escorregamentos tem se desenvolvido próximo ao topo dessas formas de relevo (IPT, 1989), onde tem-se alta tensão de cisalhamento. Há registro de escorregamentos relacionados a corte de estradas nas serras (Cruz, 1974), o que se verifica ao longo da rodovia dos Tamoios e de estradas traçadas em outros trechos da área de estudo. O tipo de deslizamento que afetou a área em 1967 é classificado como *debris flow* (corrida de massa) e a área é afetada atualmente por movimentos do tipo *landslides* (escorregamentos), conforme SMA, 1990 e IPT, 1989.

Como consequências dos escorregamentos de 1967 em Caraguatatuba ocorrem depósitos de massa sedimentar sobre as quebras de declive (zonas de contato serra-planície) assoreando a calha de alguns rios (como o Santo Antônio) sendo que o escoamento posterior produziu um novo padrão de canal, deixando meandros abandonados. Em alguns pontos houve remoção total do solo, expondo a rocha de base. Uma grande parte das cicatrizes foram

cobertas por vegetação rasteira e arbustiva, sendo rara a revegetação pela mata. É observada a ocorrência extensa de samambaias do gênero *Gleichenia*, que se adaptam em solos pouco férteis, característicos de cicatrizes devido à remoção de horizontes superiores. Nas cicatrizes de pontos menos atingidos (onde houve pouca remoção de horizontes férteis do solo) ocorre capinzal (constituído por capim gordura). Houve revegetação por *Pinus* a fim de prevenir possíveis escorregamentos mas em algumas porções este *Pinus* não se desenvolveu muito, favorecendo o surgimento de ravinas. Sobre as cicatrizes aparecem também ravinamentos que testemunham intensos processos erosivos. O evento de 1967 foi marcado por frequentes passagens de frentes polares, barradas por massas tropicais entrando em frontólise e provocando intensa condensação, acirrada pela orografia. As áreas atingidas por escorregamentos distribuem-se pelas faixas cujo valor de isoietas é de 400mm. (Cruz, 1974; IPT, 1989)

Algumas cicatrizes de escorregamentos existentes em paredões abruptos estão atualmente camufladas pela vegetação. Rampas de desgaste em áreas mais íngremes ajustam-se às desembocaduras de rios, sendo largas a jusante e estreitando-se a montante, em direção aos depósitos coluviais no pé da serra. Esses depósitos são resultantes de materiais transportados escarpa abaixo por processos de escorregamentos como *landslide* ou *flow*. Esse material tem como vias de escoamento os canais fluviais, que se alargam com o desgaste provocado pelo atrito do material movimentado sobre áreas de fraqueza (diaclasamentos, falhas). Esses tálus, por sua vez, contém material sujeito a movimentação e retém água e umidade, podendo ser rompidos por chuvas fortes, tornando-se novas áreas fontes de escorregamentos (Cruz, 1974; IPT, 1989).

As vertentes com declive maior que 35° são em geral as mais atingidas pelos escorregamentos, embora haja registros de pontos onde o declive mínimo atingido situou-se nas faixas a partir de 22°. Os interflúvios mais aplainados foram poupados, exceto os que apresentavam condições pré existentes para instabilidades, devido à ação antrópica. Bacias como a do Santo Antonio e Pereque Mirim adquirem alta energia durante chuvas mais

forte, devido à configuração côncava das vertentes e elevadas declividades. É importante observar que o mínimo de precipitação pluvial considerado pela defesa civil para alerta é de 120mm acumulado em três dias, mas devido à intensificação do impacto provocado pela ação antrópica, esse mínimo tende a se situar em valores menores (Cruz, 1974 e 1975; Nunes e Modesto, 1996)

CAPÍTULO 4

MATERIAIS E MÉTODO

Neste capítulo serão apresentados os materiais utilizados e o método adotado para o desenvolvimento deste trabalho. Estes últimos podem ser acompanhados na Figura 4.1. Após a seleção da área de estudo, procedeu-se à coleta dos dados referentes a deslizamentos (relatórios e dados de pluviosidade). A partir destes dados foram então selecionadas as imagens das quais, após os tratamentos, foram extraídas as feições de interesse. Estas feições foram então integradas, a partir de operações de álgebra de mapa, entre si e com dados extraídos de cartas topográficas e temáticas, o que permitiu a análise do papel das variáveis geomorfológicas envolvidas nos deslizamentos ocorrentes na área de estudo e a geração da carta de risco para esta área.

4.1 Materiais

Os dados e equipamentos utilizados neste trabalho são relacionados a seguir. As tabelas 4.1 e 4.2 especificam, respectivamente, os dados de sensoriamento remoto e cartográficos.

TABELA 4.1 DADOS DE SENSORIAMENTO REMOTO

Sensor/ Dados	Órbita/ Ponto	Quadrant e/subqua- drante	Formato	Bandas	Escala	Data	Ângulo Elevação Azimute Solar	
TM Landsat 5	218/76	C	Digital (Fita CCT)	3,4,5,7	—	03/07/ 88	30°	42°
	“	C	Digital (CD Rom)	1,2,3,4,5,7	—	16/12/ 96	54°	98°
	“	C/D	Analógico (papel)	543 (RGB)	1:50 000	26/06/ 97	30°	42°
Fotografia s aéreas	—	—	Analógico (papel)	Colorida normal	1:5 000	12/92	—	—
	—	—	Analógico (papel) e digital (disquete)	Pancromática	1:25 000	12/94	—	—

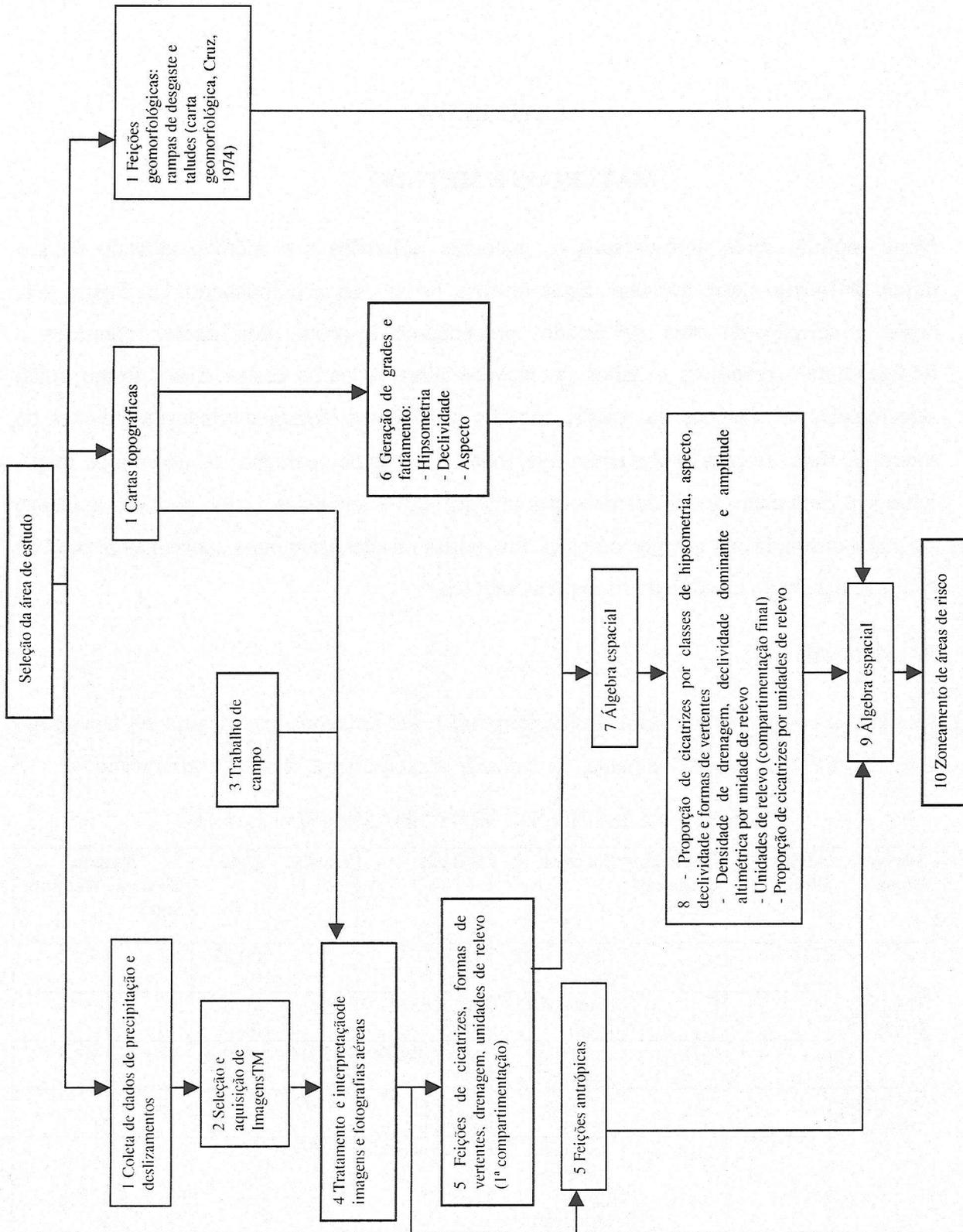


Fig. 4.1 - Fluxograma metodológico

TABELA 4.2 DADOS CARTOGRÁFICOS

Cartas	Escala	Projeção	Fonte/Data
Topográfica Pico do Papagaio SF-23-D-Y-V-2	1:50000	UTM, Hayford, Córrego Alegre	IBGE, 1974
Topográfica Caraguatatuba SF-23-D-Y-VI—1	1:50000	UTM, Hayford, Córrego Alegre	IBGE, 1986
Geomorfológica Caraguatatuba	1:50000	UTM, Hayford, Córrego Alegre	Cruz, 1974
	1:50000	UTM, Hayford, Córrego Alegre	Florenzano, 1993
Áreas de risco	1:50000	UTM, Hayford, Córrego Alegre	SMA, 1990
	1:50000	UTM, Hayford, Córrego Alegre	Okida, 1996

◆ Curvas de nível em formato digital gerado a partir das cartas topográficas citadas na Tabela 4.2.

◆ Relatórios do Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT), Instituto Geológico (IG) e COMDEC (Comissão de Defesa Civil de Caraguatatuba).

◆ Dados de precipitação fornecidos pelo Centro Técnico de Hidráulica (CTH).

◆ Equipamentos

Workstation Sun, mesa digitalizadora, estereoscópio, mesa de luz, PC Pentium 100, GPS Garmin.

◆ Programas

SPRING, para Windows, versão 3.2 e 2.5 pra Unix, ERDAS 8.3, Excel 97, Photostyler 2, Coreldraw 8.

4.2 Método

4.2.1 Seleção da Área de Estudo e Coleta de Dados

A área de estudo foi selecionada por apresentar susceptibilidade a deslizamentos, disponibilidade de dados, trabalhos realizados anteriormente relacionados ao tema (Cruz, 1974; Okida, 1996) e facilidade de acesso.

Através de pesquisas em bibliotecas, arquivos de jornais, em boletins técnicos e mapas de risco elaborados pela Comissão de Defesa Civil (COMDEC), Instituto Geológico (IG) Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) e Secretaria do Meio Ambiente (SMA), coletaram-se dados referentes a deslizamentos na área de estudo. Estes dados, apresentados na Tabela 4.3, serviram não só para datar os eventos como também caracterizar seu tipo (queda de blocos, deslizamentos, etc) e áreas de ocorrência.

Coletaram-se, junto ao CTH (1997), dados de precipitação a partir de 1985, visando a seleção de imagens TM Landsat (não existem dados referentes a 1984, ano de início da geração de dados TM).

TABELA 4.3 LOCAIS E FEIÇÕES DE RISCO IDENTIFICADOS NO PERÍODO DE 1991 A 1996

Feições de risco Locais Atingidos	03/1991		04/1991		01, 11 e 12/1992		03/1993		02 e 12/1994 a 01/1995		03 e 04/1995		11 a 12/1995 a 02/1996		
	D	Q	T	P	I	D	Q	T	P	I	D	Q	T	P	I
SP 99															
SP 55															
J. Francis															
Jaraguazinho															
Benfica															
Cantagalo															
Olaria															
Sumaré															
Martim de Sá															
Datas de Ocorrência															

FONTE: IG, IPT, Comdec Caraguatatuba (1991 a 1996).

- D - deslizamentos
- Q - queda de blocos
- T - deslizamentos sobre taludes
- P - propensão a deslizamentos
- I - feições de instabilidade (fendas, taludes, etc)

Analisando todos os dados coletados, a disponibilidade e qualidade das imagens, foram selecionadas para o desenvolvimento deste trabalho aquelas referentes aos anos de 1988 e 1996, nos quais verifica-se elevada precipitação, como mostra a Figura 4.2. Verificou-se, ainda, através dos boletins do IPT e IG, que o ano de 1996 apresentou elevados valores de pluviosidade acumulada.. Com relação à pluviosidade acumulada, deve-se salientar que a

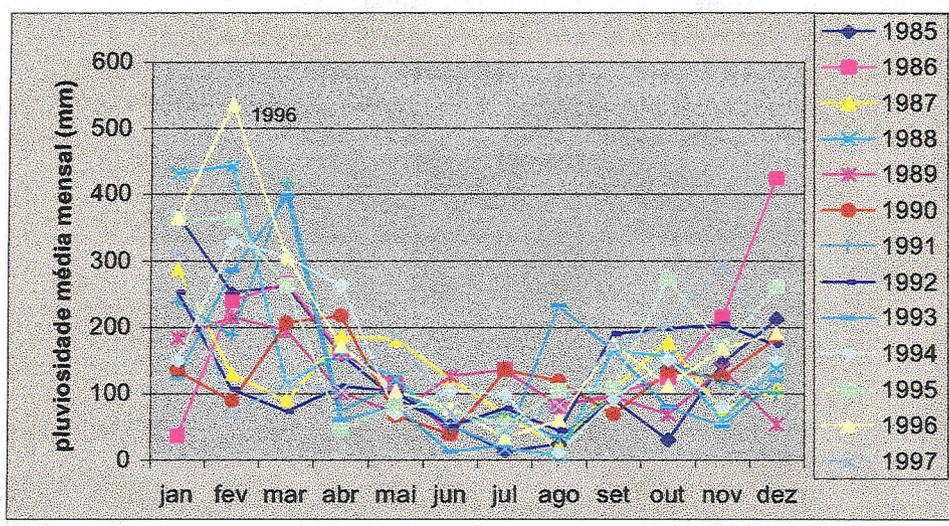


Fig 4.2 - Precipitação média mensal ao longo do período considerado.
 FONTE: CTH (1997)

expansão de áreas antropizadas tem aumentado a ocorrência e o impacto de deslizamentos e reduzido o valor de pluviosidade acumulada anteriormente estabelecido como sendo deflagrador de deslizamentos (120mm em três dias), segundo Nunes e Modesto, 1992 e 1996.

Foi realizada então uma interpretação preliminar das imagens TM. A imagem de 1996 foi selecionada para a interpretação e análise das cicatrizes de deslizamentos, pois a de 1988 corresponde a baixo ângulo de elevação solar e o sombreamento encobre vários setores da área de estudo, impedindo a extração de informações de interesse. Este fato inviabiliza um estudo multitemporal do fenômeno, pois levaria a uma análise tendenciosa das áreas

susceptíveis a deslizamentos. A imagem de 1988 foi utilizada, entretanto, para a compartimentação das unidades de relevo. Durante essa análise prévia localizaram-se na imagem os pontos referentes à Tabela 4.3 como mostra a Figura 4.3.

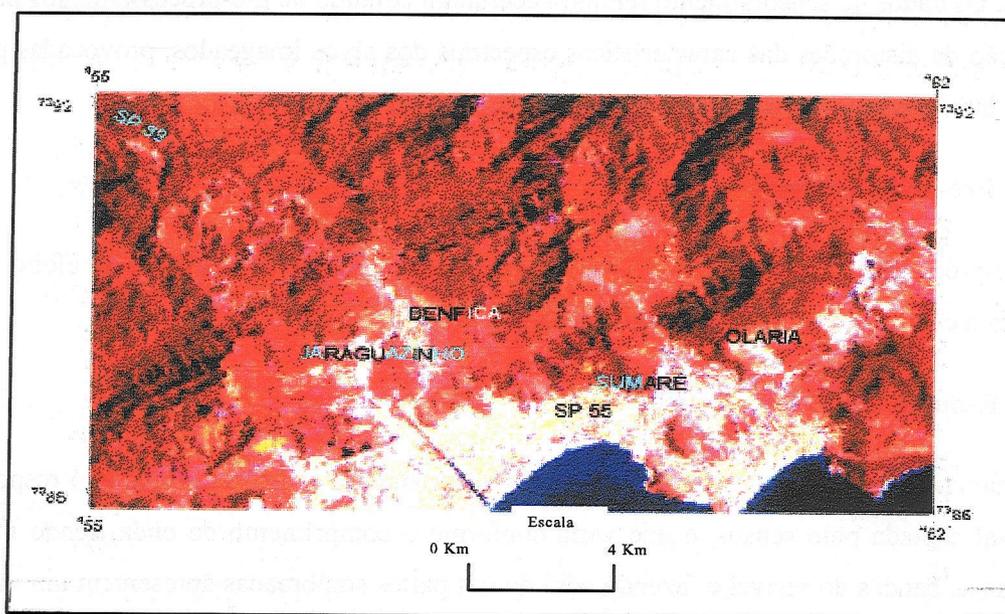


Fig 4.3 - Algumas das áreas de risco relacionadas na Tabela 4.3 e localizadas nas imagens TM 473 RGB

4.2.2 Processamento das Imagens TM

As resoluções espectrais e espacial (30m x 30m) dos dados TM mostram-se adequadas para várias aplicações ambientais. A resolução temporal nominal do TM Landsat é de 16 dias e a transmissão destes dados ao sistema de recepção do INPE é direta, disponibilizando uma quantidade adequada de imagens o que permite, a princípio, o acompanhamento de variações ocorridas na paisagem relacionadas a processos geomorfológicos, como é o caso, por exemplo, de deslizamentos. A obtenção de informações por meio das imagens de sensoriamento remoto orbital (e de fotografias aéreas) pode ser feita à partir da interpretação visual destes dados. Este método é baseado nos elementos de textura, tonalidade, cor, forma, padrão, sombreamento e contexto presentes nas imagens.

Processamentos de dados de sensoriamento remoto, como operações entre bandas, transformação por componentes principais e aumento linear de contraste, oferecem realce de feições de interesse aos objetivos do estudo realizado, facilitando a interpretação destas feições. Os dados de sensoriamento remoto necessitam contudo de pré-processamentos para a redução de distorções das características espectrais dos alvos imageados, provocadas por fatores interferentes no processo de aquisição desses dados

4.2.2.1 Pré-processamentos

Os pré-processamentos realizados neste trabalho envolveram a redução do efeito da atmosfera e correção geométrica, sendo descritos a seguir.

a - Redução dos efeitos da atmosfera.

As características da atmosfera causam um espalhamento da radiação, afetando a resposta espectral captada pelo sensor, o que varia conforme o comprimento de onda, sendo mais afetadas as bandas do visível e fazendo com que as partes sombreadas apresentem um valor mais alto do que o esperado. Isso provoca uma decorrelação da sombra entre as bandas (Milton, 1987; Novo, 1992; Steffen, 1996). Assim, é necessário efetuar tratamento da imagem para minimizar esse efeito, principalmente quando se realizam operações entre bandas e Transformação por Componentes Principais, como é o caso deste trabalho (Mather, 1987; Drury, 1993; Crosta, 1993).

Como há dificuldade em obter informações meteorológicas para a data e localização geográfica específicas de uma cena imageada, são executadas correções relativas, visando a redução do efeito provocado pelo espalhamento atmosférico na resposta espectral registrada pelo sensor. A subtração de níveis de cinza é um método, no qual é subtraído o nível de cinza adicionado ao *pixel* referente à sombra ou a um objeto cujo valor do número digital (ND) seja reconhecidamente próximo a 0 (zero), como é o caso de um corpo d'água limpo e profundo. Os valores encontrados para esses alvos são então subtraídos para toda a

imagem (Schowengerdt, 1983; Novo, 1992; Drury, 1993; Richards, 1995; Walsh et al, 1998).

Este método foi aplicado neste trabalho, no qual foram tomadas amostras dos *pixels* de sombras, da represa de Paraibuna e da porção do mar mais afastada do continente, por ser menos contaminada por sedimentos. Os valores encontrados e obtidos com a subtração podem ser vistos na Tabela 4.4.

b - Correção geométrica

Este tipo de correção baseia-se em pontos de controle extraídos das cartas topográficas e visa corrigir as distorções geométricas provocadas pela rotação e curvatura da superfície da Terra e pelo deslocamento e oscilações da plataforma. A correção é efetuada através de transformações geométricas que relacionam o posicionamento dos *pixels* da imagem com as coordenadas geográficas.

TABELA 4.4 VALORES DE ND'S DAS BANDAS DA IMAGEM TM ANTES E DEPOIS DA ATENUAÇÃO DO EFEITO DA ATMOSFERA

Sem subtração de NC				Com subtração de NC		
Bandas	Mínimo	Máximo	X*	Mínimo	Máximo	X*
1	55	255	≅70	0	199	≅14
2	20	136	≅31	0	116	≅11
3	15	181	≅28	0	165	≅12

* média amostral de *pixels* das imagens

Assim, o geo-referenciamento é baseado em um determinado sistema de coordenadas, permitindo um registro mais preciso entre mapas e imagens (Richards, 1995), como é o caso deste trabalho. Deve-se observar que os pontos selecionados para o registro devem ser

de fácil identificação a fim de oferecer maior precisão ao geo-referenciamento. Devem ser em quantidade adequada ao tamanho e características da área e ao grau do polinômio adotado. Importante também é que sejam bem distribuídos, o que oferece um ajuste mais preciso da imagem (Richards, 1995).

A correção geométrica foi realizada neste trabalho para possibilitar o registro entre o mapa Geomorfológico de Caraguatatuba, elaborado por Cruz (1974), as cartas topográficas e imagens. Os pontos de controle (como encontros de drenagem, estradas e picos de interflúvios e colinas) foram selecionados na carta topográfica, conforme os critérios destacados acima e aplicando-se um polinômio de 1º grau, adequado às transformações necessárias para a correção geométrica das imagens utilizadas (Netgis A, 1997).

Com relação à redução de ruídos, para a imagem de 1988 foi adotada a substituição de *pixels* afetados pelo ruído por *pixels* adjacentes livres de ruído, pois a banda TM 7 desta imagem apresentava ruído localizado em um pequeno segmento de uma linha. Na imagem de 1996 aplicou-se filtragem a fim de prepará-la para a razão entre bandas, testando-se filtros passa baixa (pois o ruído é caracterizado por apresentar áreas com alta frequência) com diversos pesos, conforme a literatura consultada (Crosta, 1993; Drury, 1993, Netgis A, 1997). Entretanto o resultado deste processamento não foi utilizado porque tornou as imagens inadequadas para a interpretação, devido à forte suavização, além de não minimizarem o ruído como o esperado.

4.2.2.2 Seleção de Bandas e Obtenção de Composições Coloridas

A radiação registrada pelos sensores é proveniente de objetos da superfície terrestre, sendo que estes objetos possuem uma curva espectral específica, constituindo sua assinatura espectral, o que permite a análise e interpretação de suas características biofísicas. Pela Figura 4.4 verifica-se que a curva de reflectância é ascendente para os solos a partir da banda 2, tendo seu máximo em 5 e 7 (com pequenas faixas de absorção). O concreto possui alta reflectância a partir de 0,5µm, com pico em 1,5µm (banda5). O asfalto apresenta

valores de reflectância menores que o do concreto, tendo seu pico em torno de 0,9µm (Bowker, 1985; Novo, 1992).

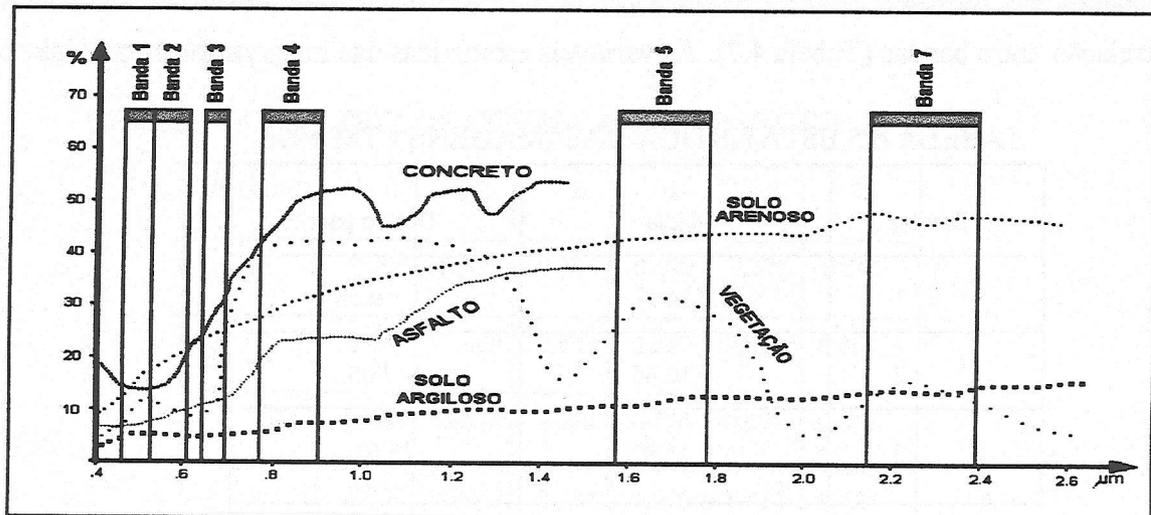


Fig 4.4 - Bandas do TM e comportamento espectral de alguns objetos
FONTE: adaptada de Bowker (1985).

As composições coloridas possíveis de serem obtidas com as bandas do TM possibilitam a obtenção de informação espectral destas bandas em uma única imagem, onde a cor é um elemento que permite a distinção entre os alvos. Estas composições podem facilitar a discriminação e identificação de feições relacionadas a movimentos de massa. De modo geral, as melhores composições são as obtidas com bandas de alta variância (pois destacam a textura) e de baixa correlação entre si (para evitar redundância de dados), o que varia conforme o comportamento espectral dos objetos da cena imageada. Deve-se observar, entretanto, que a correlação pode ser útil para o realce de feições erosivas (estendendo-se a cicatrizes de deslizamentos) e de ocupação (Florenzano 1993; Valério Filho e Pinto, 1986). As bandas do infravermelho próximo e médio possuem alta variância, o que proporciona um elevado contraste, destacando a textura e as variações topográficas (Short, 1986; Drury, 1993; Florenzano, 1993).

Neste trabalho testaram-se composições coloridas que destacam as feições de interesse - com base nas respostas espectrais dos alvos mostrados na Figura 4.4 e na análise da estatística das imagens, como a média (Tabela 4.5), variância-covariância (Tabela 4.6) e correlação entre bandas (Tabela 4.7). As variáveis estatísticas das imagens foram obtidas

TABELA 4.5 ESTATÍSTICA DAS IMAGENS - TM 1996

Bandas	Média	Desvio padrão
1	14.11	9.68
2	10.64	7.05
3	11.82	11.62
4	69.64	35.90
5	63.10	38.75
7	14.10	13.50

TABELA 4.6 MATRIZ DE VARIÂNCIA-COVARIÂNCIA - IMAGEM TM 1996

Bandas	1	2	3	4	5	7
1	93.455	58.121	88.127	-41.677	103.751	70.705
2	58.121	49.681	77.666	66.544	173.870	75.954
3	88.127	77.666	135.104	114.269	314.080	137.267
4	-41.677	66.544	114.269	1286.710	1128.371	255.204
5	103.751	173.870	314.080	1128.371	1502.239	466.756
7	70.705	75.954	137.267	255.204	466.756	181.239

automaticamente. Dessa forma, os parâmetros estatísticos subsidiaram a escolha das bandas destinadas à geração de composições coloridas e aos processamentos (operações entre bandas e Transformação por Principais Componentes), além de auxiliarem a análise dos resultados obtidos.

TABELA 4.7 MATRIZ DE CORRELAÇÃO - IMAGEM TM 1996

Bandas	1	2	3	4	5	7
1	1.000	0.853	0.784	-0.120	0.277	0.543
2	0.853	1.000	0.948	0.263	0.636	0.800
3	0.784	0.948	1.000	0.274	0.697	0.877
4	-0.120	0.263	0.274	1.000	0.812	0.528
5	0.277	0.636	0.697	0.812	1.000	0.895
7	0.543	0.800	0.877	0.528	0.895	1.000

4.2.2.3 Técnicas de Realce de Imagens

Os processamentos aplicados neste trabalho foram selecionados com base na literatura e objetivaram destacar tanto as feições diretamente ligadas aos deslizamentos (cicatrizes) como as feições indiretamente relacionadas a esses processos (características de unidades de relevo, como a forma de vertentes e a dissecação, feições antrópicas, etc). Foi realizada uma comparação visual entre os resultados obtidos pelos diversos processamentos, verificando-se a contribuição de cada um para os objetivos citados. Os processamentos efetuados neste trabalho incluem a ampliação linear de contraste (ALC), a filtragem espacial, a multiplicação entre bandas, a razão entre bandas e a Transformação por Principais Componentes. A multiplicação e a razão entre bandas são operações onde o valor

do número digital pode extrapolar os 256 níveis de cinza, portanto o algoritmo utilizado reescala os valores obtidos, mantendo-os na faixa de 0 a 255.

a - Ampliação linear de contraste (ALC)

Para melhorar o contraste das imagens utilizam-se técnicas de realce, como a manipulação do seu histograma. Um procedimento usual é o realce linear, através do qual se expandem os valores dos níveis de cinza redistribuindo-os em toda a escala de 0 a 255. O realce linear possibilita um aumento na variância dos dados e, conseqüentemente, um melhor contraste. Deve-se observar a escolha dos limites de níveis de cinza a fim de se evitar a saturação nos valores extremos (0 ou 255, para imagens Spot e Landsat). Os valores adotados variam conforme a banda e outras características da imagem. Ao se deslocar a média e a variância da imagem, altera-se, respectivamente, o brilho e o contraste desta imagem (Richards, 1995).

Aplicou-se o ALC nas bandas selecionadas das imagens de 1996 e 1988 e nas imagens resultantes da multiplicação, da razão, do NDVI e da Transformação por Componentes Principais. Este procedimento foi realizado através da manipulação do histograma das imagens, de forma a se destacar as feições de interesse e evitar a saturação dos níveis de cinza.

b – Multiplicação entre bandas

Este processamento é citado por Mather (1987) como sendo destinado a destacar as variações sutis existentes em uma determinada região da cena imageada em relação a outras regiões, cujas variações sejam mais perceptíveis para o sistema visual. O procedimento descrito por este autor refere-se à multiplicação de bandas por uma máscara, de forma a filtrar, na imagem resultante, apenas os pixels referentes à região que se deseja destacar, realçando as variações existentes nela, ao se fazer uma composição em RGB. Neste trabalho, esta operação tem como objetivo gerar uma composição colorida através da multiplicação de uma banda que contenha maior informação textural pelas demais bandas

selecionadas para a composição. Com isto tem-se uma composição RGB na qual se destaca a textura (variação de intensidade do brilho dos *pixels* e contraste claro-escuro). Este processamento tem grande aplicação em estudos geomorfológicos, pois destaca as variações do relevo, tornando mais nítidas as feições como cristas, vales e zonas de contato, como planícies-serras, já que essas variações são dadas pelo sombreamento, tendo este alta correlação entre bandas, o que é realçado com a multiplicação (Crosta, 1993; Crosta, 1998).

Para a multiplicação entre bandas realizada neste trabalho, foi selecionado o conjunto composto pelas bandas TM 2, TM 5 e TM 7 da imagem de 1996, multiplicando-se cada uma destas pela banda TM 4. Estas bandas foram selecionadas por destacarem as feições espectrais de interesse (TM 5 e TM 7 estão associadas a alta resposta do solo) e porque as bandas TM 2 e TM 4 possuem baixa correlação. A banda TM 4 foi escolhida pelo fato de que no caso de imagens tomadas de áreas com densa cobertura vegetal recobrimo a maior parte da cena (caso da área de estudo), esta banda, por expressar o pico de reflectância da vegetação, contribui para a maior intensidade de brilho da cena, além de expressar a variação deste brilho (Crosta, 1993; Crosta, 1998). Como a banda 5 mostra elevada variância (maior que a banda 4) no caso da imagem utilizada, testou-se também as imagens 3, 4 e 7 multiplicando cada uma pela banda 5. Também testaram-se composições formadas pelas imagens resultantes da multiplicação da banda TM4 pelos triplete TM1, TM5 e TM7 e TM1, TM 3 e TM 7, por ter a banda TM 1 correlação muito baixa com as demais (principalmente as bandas TM4 e TM5).

A imagem de 1996 foi escolhida para teste deste processamento por ter sido tomada com alto ângulo de elevação, o que atenuou o efeito topográfico, mas, por outro lado, permitiu a visualização de setores que apresentaram feições de interesse e que na imagem de 1988 (ângulo baixo) estão totalmente encobertos por sombreamento. O objetivo deste processamento foi o de delimitar as unidades de relevo, e a partir do mapeamento feito por Florenzano (1993), obter o maior detalhamento da compartimentação destas unidades (principalmente nos setores referentes às escarpas), a fim de se verificar nestas unidades os

indicadores relacionados a deslizamentos, como a dissecação, amplitude altimétrica e declividade dominante, o que serviu de base para uma re-classificação das unidades delimitadas.

c - Razão entre bandas

A razão entre bandas permite discriminar diferenças sutis existentes no comportamento espectral de diferentes alvos. Em bandas originais apenas as diferenças mais grosseiras são notadas. Observando-se o comportamento espectral dos alvos de interesse, selecionaram-se as bandas nas quais aplicou-se a razão, selecionando-se as bandas que cubriam valores máximos e mínimos de reflectância (bandas pouco correlacionadas) e que expressassem o gradiente da curva espectral dos objetos de interesse, proporcionando, assim, o realce desses objetos.

A razão entre bandas tem a desvantagem de causar o exagero de ruídos e perda de textura devido à atenuação do sombreamento. Esta ocorre porque o sombreamento é altamente correlacionado em todas as bandas sendo esta correlação suprimida quando se efetua a razão, o que provoca perda de informação relativa à topografia. Outra desvantagem da razão entre bandas é a não distinção entre alvos com comportamento espectral similar. Se alvos possuem albedos diferentes (expressos na imagem pela intensidade de brilho do nível de cinza) mas propriedades espectrais inerentes similares, ao se fazer a razão de bandas esses alvos acabam por serem expressos de forma semelhante ou igual, tornando-se indistintos, ao passo que nas bandas originais são perfeitamente distinguíveis devido à diferença no albedo (Mather, 1987; Crosta, 1993; Drury, 1993).

As bandas apropriadas para realçar o contraste entre áreas vegetadas e áreas não vegetadas são a TM 4 e a TM 3. A razão entre estas bandas coloca em evidência diferenças dentro da cobertura vegetal, por enfatizar as variações existentes nos picos das faixas do infravermelho (TM 4) e do visível (TM 3). Os NC's correspondentes à vegetação densa e sadia aparecem mais claros que os correspondentes ao solo nessa razão, pois tem-se um

maior valor para o numerador que para o denominador (Mather, 1987; Crosta, 1993; Drury, 1993).

Uma dos tipos de razão entre bandas é o Índice de Vegetação com Diferença Normalizada ou NDVI (do inglês: *Normalized Difference Vegetation Index*), obtido com os dados TM por:

$$\frac{TM4 - TM3}{TM4 + TM3} \quad (4.1)$$

onde TM3 e TM4 são as bandas 3 e 4 do TM Landsat.

Tanto a razão 4/3 quanto o NDVI discriminam áreas vegetadas daquelas com escassa ou nenhuma cobertura vegetal. Como os solos e superfícies contruídas têm resposta alta a partir da banda 3 e a vegetação apresenta um pico na banda TM 4 (infravermelho próximo), essas operações aumentam o contraste entre esses tipos de superfícies e a variação e densidade da cobertura vegetal, o que pode ser indicador de processos geomórficos (Drury, 1993; Crosta, 1993; McKean et al, 1991; Walsh et al, 1998).

A razão da banda TM 5 pela TM 7 realça feições relativas a solos argilosos. Os efeitos rotacionais das moléculas hidroxiladas (como Al-OH e Mg-OH) associados à argila provocam uma faixa de absorção na banda TM 7. Ao se fazer a razão entre as bandas TM 5 e TM 7 tem-se um destaque de solos argilosos, aparecendo estes em NC's claros. Deve-se observar que o resultado dessa operação é influenciado pela interferência de outros alvos. Uma camada delgada de vegetação, por exemplo, interfere no valor resultante da operação, pois a radiância captada pelo sensor integra também a resposta da vegetação, contaminando, conseqüentemente, o *pixel* (Drury, 1993).

Já para o asfalto e concreto as curvas apresentam um baixo valor de reflectância na faixa correspondente à banda TM 1 e alto valor para a banda TM 4. A diferença entre ambos é

que o asfalto possui valor de reflectância mais baixo que o concreto, além deste último apresentar feições de absorção para as bandas 1 e 4, como pode-se observar na Figura 4.4

Assim, efetuaram-se neste trabalho as razões 5/7, 4/3, 4/1. Com este triplete testaram-se as melhores composições RGB, com a finalidade de destacar setores com escassa ou nenhuma vegetação (referentes a feições antrópicas e às cicatrizes de deslizamentos e/ou tombamentos), diferenças entre solo exposto (dada pela razão 5/7, já que o predomínio de solos é argiloso) e área construída (dada por 4/1). Também analisou-se a razão 4/3 isoladamente, bem como testou-se o uso de NDVI.

d - Transformação por Componentes Principais (TCP)

A Transformação por Componentes Principais visa a redução da dimensionalidade dos dados e a remoção da redundância de informações oferecendo uma maior separabilidade de alvos. A natureza multidimensional dos dados de sensoriamento remoto (seis dimensões no caso dos dados TM Landsat utilizados neste trabalho, ou seja, as bandas 1, 2, 3, 4, 5 e 7) pode ser expressa sob a forma de um espaço vetorial, no qual um determinado *pixel* é posicionado em um sistema de coordenadas, correspondendo essa posição a um vetor que representa o valor ponderado do brilho deste *pixel*, considerando-se todas as bandas do espaço multiespectral. O valor do brilho de um *pixel* numa banda componente principal é resultante da ponderação do valor do brilho que este *pixel* possui em cada banda original.

O algoritmo efetua a TCP a partir da variância e covariância das bandas originais, e do coeficiente de correlação entre elas, realizando uma transformação linear das bandas originais em novas variáveis, que são as componentes principais (CP's), sendo estas últimas a combinação linear das bandas originais. A primeira CP retém a maior proporção da variância total dos dados, diminuindo esta proporção para as componentes seguintes. A contribuição de cada banda original para cada CP é dada pelos autovetores, calculados a partir da variância e covariância das imagens (Crosta, 1993; Drury, 1993; Richards, 1995).

Neste trabalho foram geradas as imagens CP's a partir das bandas 1, 2, 3, 4, 5 e 7 da imagem de 1996. Com as imagens CP's geradas foram testadas várias composições coloridas, de forma a obter o melhor resultado visual para a interpretação dos alvos de interesse.

e – Outros processamentos

Com a finalidade de destacar o relevo, o contato entre as unidades geomorfológicas e as feições lineares (como a drenagem), foram testados também filtros passa altas nos quais as janelas possuem valores que destacam os componentes de alta frequência espacial da imagem, de modo a enfatizar as transições entre diferentes áreas e realçar a textura, mas as imagens resultantes da aplicação de filtragem mostraram-se degradadas e confusas para a interpretação de modo geral.

As tentativas de integração entre dados TM e outros de resolução espacial mais fina (Spot e fotografias aéreas) foram inviabilizadas pela não disponibilidade de dados (as imagens Spot apresentavam-se com muita cobertura de nuvens) e de ferramentas apropriadas para ortorretificação das fotografias aéreas. Os testes realizados no SPRING para ortorretificar as fotografias não ofereceram os resultados adequados.

4.2.2.4 Interpretação de Dados de Sensoriamento Remoto

As imagens TM resultantes dos processamentos aplicados foram interpretadas com base nos elementos de análise de imagens: textura, tonalidade, cor, forma, padrão e contexto.

A textura de uma imagem é dada pela variação de níveis de cinza (ou pela variação em matiz, nas composições coloridas), expressando a frequência espacial. A tonalidade está relacionada às características espectrais dos objetos (comportamento de um único objeto ou a combinação entre diferentes objetos) e ao sombreamento, sendo que este último auxilia na interpretação do relevo. O efeito de sombreamento presente em imagens de Sensoriamento Remoto possibilita a observação da textura do relevo e do nível de incisão da drenagem. O

par luz-sombra também dá a noção da altura e inclinação de vertentes através da simetria do relevo (Veneziani e Anjos, 1982; Lillesand e Kiefer, 1994 ;Rydén, 1997).

A cor permite distinguir diferentes objetos (ou a combinação destes) presentes na cena, dependendo das faixas espectrais a que é atribuída. A variação matiz de uma cor está também relacionada às características biofísicas do alvo.

A forma e o padrão relacionam-se às diferentes maneiras com que as feições naturais ou antrópicas se organizam na cena imageada. A análise de contexto engloba as relações dos objetos interpretados entre si e com outros fatores, considerando as características da cena imageada que direta e indiretamente permitem inferir o comportamento de determinado fenômeno. Estes elementos se complementam na interpretação dos dados de sensoriamento remoto sendo utilizados conjuntamente (Verstappen, 1977; Lillesand e Kiefer, 1994).

Outro recurso que auxilia a interpretação de feições de interesse é a estereoscopia (Verstappen, 1977), que pode ser obtida por pares de fotografias aéreas e através de produtos gerados a partir de alguns sensores orbitais mais recentes, como o HRV Spot.

Neste trabalho analisaram-se as fotografias aéreas e cartas topográficas como auxiliares na interpretação das cicatrizes de deslizamentos observadas nas imagens. As cicatrizes identificadas nas imagens e que se encontravam acessíveis (ao longo da rodovia SP 99 e em pontos de fácil acesso) foram localizadas em trabalho de campo, com o auxílio de GPS, das cartas topográficas e da imagem analógica. As cicatrizes de difícil acesso foram mapeadas utilizando-se as fotografias aéreas como verdade terrestre, a partir das cicatrizes reconhecidas em campo e pelos elementos de interpretação. Foram utilizados pares estereoscópicos das fotografias aéreas na interpretação tanto das cicatrizes quanto de outros alvos, como feições antrópicas e de vegetação.

O trabalho de campo foi realizado em duas etapas. A primeira visou o reconhecimento da área de estudo e a observação de feições de cicatrizes e antrópicas. A segunda etapa foi realizada em conjunto com os técnicos do IPT e teve como objetivo a observação de

cicatrizes e de outras feições relacionadas aos deslizamentos, tais como, taludes, etc. Foram verificadas tanto as áreas já reconhecidas como de risco pela Defesa Civil quanto as ainda não registradas em relatórios e boletins.

Algumas das cicatrizes apresentaram cores diferentes entre si em algumas das composições testadas, procedendo-se à análise do seu perfil espectral. Este perfil foi obtido a partir da amostragem de *pixels* referentes às cicatrizes. A diferença de tonalidade dada por áreas vegetadas e não vegetadas foi interpretada e analisada nas imagens resultantes da razão entre bandas TM4 e TM3 e do NDVI. A diferença na cor e matiz foi observada tanto nas composições feitas a partir das bandas TM selecionadas como da composição elaborada com as imagens resultantes das razões entre bandas.

Dados de sensoriamento remoto complementados pelas cartas topográficas fornecem rica informação da rede de drenagem (Florenzano, 1993; Okida, 1996). Neste trabalho as bandas TM 4 e TM5 foram testadas para a interpretação da drenagem, comparando-se a contribuição de cada uma. De acordo com a bibliografia, a banda TM5 destaca a umidade da vegetação, o que realça a mata ciliar, permitindo delinear canais por meio desta última, embora este procedimento seja mais adequado para regiões onde se tenha pouca densidade de vegetação, o que não ocorre na área de estudo (Novo, 1992; Florenzano, 1993). A imagem RGB composta com as imagens resultantes da multiplicação também foi utilizada para a interpretação da drenagem.

Para a compartimentação das unidades de relevo foi observada a textura (como proposto por Pike, 1988) e formas de vertentes nas composições coloridas obtidas com as imagens resultantes da multiplicação (1996) e com as imagens de 1988, por estas serem tomadas com baixo ângulo de elevação solar e conseqüentemente apresentarem maior sombreamento, sendo próprias para a caracterização de relevo (Drury, 1993; Florenzano, 1993). A interpretação do par luz-sombra foi usada para a verificação da simetria e da amplitude e declive das vertentes. A interpretação das imagens foi acompanhada da análise das cartas topográficas e o resultado comparado àquele obtido por Florenzano (1993).

4.2.3 Tratamento da dados em SIG

4.2.3.1 Esquema conceitual de SIG e uso do SPRING (Sistema de Processamento de Informações Georreferenciadas)

Os SIG's permitem armazenar e integrar (através de operações específicas) dados georreferenciados, ou seja, com localização geográfica específica, de diferentes escalas. (Borroughs e McDonell, 1998; INPE, 1998). Ao integrar informações espaciais e oferecer condições de combiná-las, o SIG se mostra um sistema capaz de oferecer suporte a decisões relacionadas a aspectos espaciais (Aronoff, 1989; INPE, 1998).

Os dados existentes em um SIG possuem duas formas de representação computacional:

- ✓ Vetorial: na qual um elemento é reproduzido por pontos, linhas ou polígonos
- ✓ Matricial (raster): na qual um elemento é reproduzido por células que contém um código referente ao atributo dessa.

As operações possíveis de serem realizadas em um SIG envolvem, entre outras, a intersecção de dados, a classificação, o fatiamento (agrupamento de classes), etc. Através dessas operações geram-se resultados qualitativos e/ou quantitativos que permitem a análise do comportamento espacial de um certo fenômeno.

Como destacado anteriormente, a análise de fenômenos como deslizamentos tem no SIG um apoio importante pois este oferece a possibilidade de extração de índices morfométricos como amplitude, dissecação, declividade e aspecto, além de efetuar o armazenamento e cruzamento de vários tipos de dados, permitindo a caracterização de áreas e estabelecer seu grau de risco.

Como já citado no Capítulo 2, o MNT é um recurso do SIG que expressa as dimensões espaciais de uma determinada porção da superfície terrestre. No caso do terreno, o MNT representa a declividade, a altimetria e o aspecto (azimute) das vertentes, através de grades

que permitem o fatiamento e as operações com estes dados. Algoritmos têm sido desenvolvidos para a geração de grade para formas de vertentes e densidade de drenagem (O'Callaghan e Mark, 1984; Weibel e Heller, 1994; Borroughs e McDonell, 1998).

Com relação às grades existem dois tipos: retangular e triangular (TIN-Triangular Irregular Network). A primeira é uma matriz de pontos equidistantes dispostos em um eixo ortogonal que modela a superfície a partir de poliedros com faces retangulares, já a grade TIN realiza a modelagem a partir de uma superfície contínua de poliedros com faces triangulares, cujos pontos (arestas) são dispostos irregularmente. A grade TIN permite interpolar com mais detalhe pontos de relevos com muita variação, com a vantagem de evitar redundância em porções planas (O'Callaghan e Mark, 1984; Weibel e Heller, 1994; Borroughs e McDonell, 1998).

A precisão de um interpolador para gerar uma TIN é maior se realizada com o auxílio de linhas de quebra (Figura 4.5). Estas linhas podem ser compostas pela drenagem previamente digitalizada e não precisam ter valor de cota associado. Com estas linhas de quebra tem-se uma melhor definição de canais e vales, conferindo maior precisão na obtenção da declividade neste pontos, além de se evitar a criação de artefatos computacionais, ou seja, elementos inexistentes nos dados de entrada mas gerados devido à imprecisão dos interpoladores. Estes artefatos ocorrem especialmente em áreas onde existem poucos dados, como áreas planas e/ou com poucas curvas de nível digitalizadas. Ao se realizar a triangulação a linha de quebra servirá como ponto para formação de triângulos na interpolação, representando melhor as feições citadas acima. (O'Callaghan e Mark, 1984; Dikau, 1990; Tarboton et al., 1991; Netgis B, 1997; Borroughs e McDonell, 1998). Com relação à grade retangular, esta é necessária, pois operações como fatiamento e cruzamento de dados necessitam da forma matricial para serem tratados. A grade TIN pode ser convertida para uma grade retangular de forma a gerar uma imagem raster. Dessa maneira, tem-se uma imagem matricial que mantém a acurácia adquirida pelo TIN, tendo-se melhor representação de variações do terreno, como cristas e vales, sob forma de eixos

ortogonais, necessária ao fatiamento e demais operações (O'Callaghan e Mark,1984; Tarboton et al., 1991; Borroughs e Mcdonell,1998).

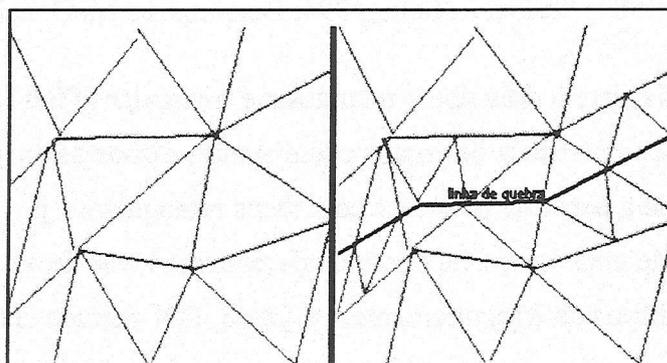


Fig - 4.5 TIN sem e com linha de quebra
FONTE: modificada de: Netgis B (1997, p. 2.10).

Neste trabalho utilizou-se o módulo de SIG do SPRING. O esquema conceitual deste programa compreende (Netgis C 1987; INPE, 1998):

- ✓ Banco de dados: onde são inseridos os diversos dados a serem utilizados.
- ✓ Projeto: onde são fornecidos o sistema de projeção cartográfica adotado e as coordenadas geográficas da área estudada.
- ✓ Categoria: onde os dados inseridos são agrupados conforme a sua natureza (se imagem, numérico ou temático).
- ✓ Plano de informação (PI): é a representação geográfica dos diferentes dados inseridos no banco de dados (imagem e/ou mapas). Associado ao PI tem-se as classes. Por exemplo, as feições geomorfológicas são classes do PI “Mapa Geomorfológico”. Mesmo que haja uma única classe para o PI essa deve ser informada a fim de permitir a realização de operações.

Alguns dos operadores que realizam as operações entre os PI's estão implementados sob forma de uma linguagem de consulta espacial, que deve expressar o relacionamento

espacial dos dados e recuperar informações como escala, cor, etc. No caso do SPRING o programa Linguagem Espacial para Geoprocessamento Algébrico (LEGAL) é o responsável por tais operações. As operações realizadas em LEGAL permitem a modelagem de procedimentos sob forma descritiva sendo os dados e os procedimentos declarados e organizados segundo regras gramaticais, sob forma de um programa. Esse programa é composto por três componentes: declaração, instanciação e operação. Na declaração definem-se os dados existentes nos PI's, associando-os à categoria em que estão inseridos. Na instanciação cria-se um novo PI, recuperando-se os dados existentes no banco de dados o qual conterà o resultado da operação a ser realizada com estes dados. O terceiro componente é a operação realizada (Netgis B, 1987).

Algumas das operações possíveis de se efetuar são:

- ✓ vizinhança, na qual obtem-se um valor de saída a partir da interpolação de dados próximos (entre isolinhas, gerando a declividade, por exemplo)
- ✓ zonal, na qual calcula-se algum valor desejado em um PI tendo-se um outro PI como restrição (amplitude altimétrica em uma certa unidade de relevo, por exemplo).
- ✓ booleana, que permite gerar um PI temático a partir de condições aplicadas aos PI's de entrada (mapa de áreas de risco a partir de critérios que definem o grau desses riscos).

Os PI's precisam estar sob forma matricial para que se efetuem as operações desejadas. Estas operações tornam possível a integração de vários tipos de dados, como mapas, imagens, dados de campo, etc, resultando em um plano de informação que representa a síntese dessa integração.

4.2.3.2 Operações entre PI's

A resolução adotada para as grades referentes ao MNT, na rasterização dos PI's e na geração do PI de graus de risco foi de 30m x 30m, compatível com a resolução espacial dos dados TM.

As operações realizadas neste trabalho foram de três tipos:

- ✓ vizinhança: para as variáveis morfométricas: declividade, aspecto e altimetria
- ✓ zonal: para obtenção de densidade de drenagem, amplitude altimétrica, declividade dominante, proporção de cicatrizes por intervalos de classes das variáveis morfométricas e proporção de cicatrizes por unidades de relevo (Apêndices B1 a B8).
- ✓ booleana: para atribuição de graus de risco a partir dos critérios escolhidos.

A seguir, são detalhados os procedimentos para estes PI's e para as operações realizadas:

◆ Cicatrizes e áreas ocupadas

As cicatrizes mapeadas foram digitalizadas diretamente da tela, atribuindo-se uma única classe a estas feições. O mesmo procedimento foi adotado para as feições referentes à ocupação (que engloba estradas e áreas residenciais) também atribuindo-se a elas uma única classe.

◆ Unidades de relevo

As unidades de relevo foram interpretadas diretamente na tela do sistema computacional utilizado, sendo delimitadas com base inicialmente na textura das imagens e na análise das cartas topográficas e no mapa Geomorfológico de Caraguatatuba, elaborado por Florenzano (1993), visando detalhar principalmente os setores referentes às escarpas. Delimitaram-se inicialmente 20 unidades, cada uma das quais correspondendo a uma classe existente dentro do PI de unidades de relevo. Para cada uma das unidades foram calculadas (utilizando o

LEGAL) a densidade de drenagem (obtendo-se, assim, a dissecação) a amplitude altimétrica e a declividade dominante. Os valores obtidos para estas variáveis foram, então, reunidos em 5 classes: Baixo, Moderado, Moderado-alto, Alto, Muito Alto. O número de classes foi obtido pela fórmula de Sturges:

$$K = 1 + 3,3 \log_{10} n \quad (4.2)$$

Onde:

K = número de classes

n = número de observações (no caso = 20, referentes às 20 unidades inicialmente delimitadas)

A amplitude dos intervalos das classes foi obtida por:

$$\frac{\Delta V}{K} \quad (4.3)$$

Onde:

ΔV = diferença entre os valores máximos e mínimos encontrados para cada variável.

K = é o número de classes encontrado pela equação 4.2

Este método é simples e permite estabelecer rapidamente o número e a amplitude de intervalos de classes adequados aos valores observados (Gerardi e Silva, 1981).

Assim, com estes parâmetros e a partir dos valores encontrados foram obtidas as classes mostradas na Tabela 4.8.

Deve-se enfatizar que a área como um todo possui elevados valores para a dissecação, amplitude altimétrica e declividade dominante, o que torna a classificação acima específica para áreas escarpadas e de elevada dissecação. Dessa forma, os termos Baixo e Moderado

devem ser considerados dentro das características semelhantes às encontradas na área de estudo.

Com base nas classes definidas na Tabela 4.8 e em outras características, como as formas de vertentes (apoiando-se no Mapa Geomorfológico de Caraguatatuba elaborado

TABELA 4.8 CLASSES DE MORFOMETRIA

Classes	Parâmetros Morfométricos	Densidade de drenagem (Km/Km²)	Amplitude altimétrica (m)	Declividade Dominante (graus)
Baixo (B)		< 2,4	< 276,9	< 10,9
Moderado (M)		2,5 – 3,1	277 – 401,9	11 – 16,9
Moderado-alto (MA)		3,2 – 3,8	402 – 526,9	17 – 21,9
Alto (A)		3,9 – 4,5	527 – 651,9	22 – 27,9
Muito alto (AA)		> 4,6	> 652	> 28

por Florenzano, 1993), foi efetuada uma nova classificação das 20 classes inicialmente delimitadas, agrupando-se algumas e obtendo-se, assim 18 classes. As unidades que apresentaram características morfométricas iguais mas se diferenciavam pela morfografia foram mantidas separadas.

◆ Drenagem

A rede de drenagem foi inicialmente digitalizada, através de mesa digitalizadora, a partir das cartas topográficas previamente registradas, sendo posteriormente completada pela interpretação das imagens selecionadas e pela observação do crenulamento das curvas de

nível (Gardner et al., 1990; Walsh et al, 1998). A interpretação foi realizada traçando-se a drenagem diretamente na tela. Assim, foram extraídos tanto os canais perenes quanto os temporários. A drenagem extraída por este método foi comparada com o mapa de drenagem elaborado por Okida (1996). Foi atribuída uma única classe a todos os canais, visando a obtenção do somatório de seus comprimentos dentro de cada unidade de relevo, o que foi realizado pelo LEGAL (Apêndice B1).

◆ Feições geomorfológicas

O PI de feições geomorfológicas englobou apenas as feições relacionadas aos riscos de deslizamentos (tálus e rampas de desgaste), sendo atribuída uma única classe a esse PI (classe de feições de risco). Este PI foi obtido a partir da digitalização do mapa geomorfológico de Cruz (1974), sendo este previamente registrado com as imagens.

◆ Formas de vertentes

A não disponibilidade de algoritmo destinado a gerar uma grade para as formas de vertentes levou a uma análise qualitativa e simplificada destas formas, a partir da interpretação visual das imagens e das curvas de nível digitalizadas. Esta interpretação foi feita diretamente na tela apenas para as áreas que apresentaram cicatrizes. Conforme a disposição das curvas, atribuiu-se às formas as classes de retilíneas, côncavas ou convexas.

◆ Índices morfométricos

A partir das curvas de nível digitalizadas geraram-se as grades TIN (Triangular Irregular Network - Grade Triangular Irregular) e retangular. A grade TIN foi gerada com linhas de quebra (dada pela drenagem) para melhor representação das variações do relevo. A partir da TIN foi gerada a grade retangular (a fim de permitir fatiamento destinado à hipsometria e geração de carta hipsométrica e para operações no LEGAL, destinadas ao cálculo de amplitude altimétrica). O fatiamento da declividade e do aspecto (e respectiva geração de cartas de declividade e aspecto) e o cálculo da declividade dominante nas unidades de

relevo através do LEGAL foram efetuados a partir da grade de declive (gerada, por sua vez, a partir da grade TIN).

Para solucionar o problema de artefatos computacionais gerados nos setores da planície, suprimiu-se a drenagem nos trechos não importantes para este trabalho e introduziu-se pontos e isolinhas na planície e ao redor de algumas drenagens. Estes pontos e isolinhas tiveram valores arbitrários, porém intermediários aos valores das cotas existentes.

Os intervalos adotados neste trabalho para as classes morfométricas, englobam as classes que reconhecidamente são as mais afetadas por deslizamentos, conforme a literatura consultada (Clark e Small, 1982; McKean et al, 1991; Gao e Lo, 1995; Guimarães et al., 1998). No caso da declividade, seguiu-se o fatiamento feito por Cruz (1975), porém detalhando as classes superiores a 22°, conforme proposto pela própria autora, obtendo-se os seguintes intervalos:

- ✓ Declividade (graus) : 0-3, 3-6, 6-12, 12-17, 17-22, 22-27, 27-32, 32-37, 37-45, 45-60, 60-75.

Para a hipsometria adotou-se o fatiamento efetuado por Florenzano (1993), ampliando os valores da última classe para englobar as cotas abrangidas neste trabalho. Este fatiamento está de acordo também com os trabalhos referentes a riscos de deslizamentos, como o de McKean et al (1991) e Guimarães et al (1998), obtendo-se os seguintes intervalos:

- ✓ Hipsometria (metros): 0-20, 20-100, 100-300, 300-500, 500-700, 700-900, 900-1060.

Para a definição dos intervalos referentes ao aspecto do terreno, verificou-se os trabalhos de Dikau (1990), McKean et al (1991) e Guimarães et al (1998), obtendo-se as seguintes classes:

- ✓ Aspecto (graus): 0-45 (N), 45-90 (NE), 90-135 (E), 135-180 (SE), 180-225 (S), 225-270 (SW), 270-315 (W), 315-360 (NW).

Os índices morfométricos foram utilizados não apenas para verificar a relação entre cicatrizes e estes índices, mas também para auxiliar a interpretação de imagens, como a relação entre o aspecto e a iluminação da cena e o contexto das feições observadas.

A densidade de drenagem foi computada através da contagem de pixels, conforme método adotado por Tarboton et al. (1991), referentes aos canais de drenagem por unidade de relevo. O operador utilizado neste programa é o de contagem zonal e pode ser visto no Apêndice B1. A área das unidades de relevo é fornecida automaticamente (em Km²). Para a obtenção do comprimento total da drenagem, multiplicou-se o valor encontrado de *pixels* referentes aos canais de drenagem existentes em cada unidade de relevo por 30m (correspondente ao comprimento do *pixel*, conforme a resolução adotada para a rasterização), convertendo o valor obtido para a unidade em Km.

Os valores de amplitude altimétrica e declividade dominante para cada unidade de relevo foram computados, respectivamente, a partir das grades retangulares e de declive por meio de operadores elaborados em LEGAL (Apêndice B2 e B3). Estes operadores são algoritmos desenvolvidos, respectivamente, para a faixa zonal (cálculo de variação entre valores máximos e mínimos em determinado setor de uma grade) e maioria zonal (cálculo de valores predominantes em determinado setor de uma grade).

O objetivo da extração das variáveis de densidade de drenagem, amplitude e declividade dominante por unidade de relevo foi caracterizar essas unidades e verificar a relação entre essas características e a ocorrência de cicatrizes.

- ◆ Proporção de cicatrizes por intervalos de classes de variáveis morfométricas e por unidades de relevo afetadas

A análise de áreas afetadas por escorregamentos e sua relação com a declividade, o aspecto e a altimetria através da proporção de pixels é demonstrada por Gao e Lo (1995), Dikau (1990) e Guimarães et al. (1998). Esta relação é dada por:

$$\left(\frac{\sum A_c}{\sum A_t}\right) \times 100 \quad \text{e} \quad \left(\frac{\sum A_{cic}}{\sum A_{cit}}\right) \times 100 \quad (4.4)$$

Onde:

A_c é o número de pixels correspondentes a um determinado intervalo de classe de uma determinada variável considerada (aspecto, declive ou hipsometria) na área de estudo.

A_t o total de pixels correspondentes a essa variável na área de estudo.

A_{cic} é o número de pixels correspondente às cicatrizes presentes em um determinado intervalo de classe de uma variável considerada.

A_{cit} é o total de pixels referentes às cicatrizes presentes nessa variável.

Estas relações mostram a proporção (em %) em que os intervalos de classe das variáveis consideradas ocorrem na área de estudo e a proporção de cicatrizes nesses intervalos, expressando o potencial desses intervalos à ocorrência de deslizamentos.

O mesmo método foi adotado para verificar a proporção de cicatrizes em formas de vertentes e nas unidades de relevo afetadas por deslizamentos, visando observar a relação entre as características morfométricas (dissecação, declividade dominante e amplitude), a ocorrência de feições antrópicas e geomorfológicas de interesse e a proporção de área afetada por cicatrizes nestas unidades.

O cômputo de pixels referentes às unidades de relevo e das classes das variáveis foi obtido automaticamente, apresentando o valor em Km^2 . Como a resolução adotada é de 900m^2 ($30\text{m} \times 30\text{m}$), procedendo-se à razão do valor obtido por 0,0009 obtém-se então a frequência de pixels. Já o cômputo de pixels referentes às cicatrizes por classes de variáveis e por unidades de relevo é obtido pelo LEGAL, através de programa que realiza a contagem de pixels presentes em cada classe e em cada unidade (Apêndices B4 a B8).

◆ Carta de susceptibilidade à riscos de deslizamentos

Para o zoneamento de susceptibilidade a riscos de deslizamentos há propostas de mapas elaborados de forma simplificada. Estes mapas são baseados em deslizamentos registrados, tendo-se como pressuposto que uma área afetada por deslizamentos é susceptível ao retorno deste tipo de evento (Selby, 1982; Fernandes e Amaral, 1996). Uma das formas de zoneamento considera as características geomorfológicas associadas à ação antrópica para a definição dos graus de risco (Fernandes e Amaral, 1996). Para este trabalho adaptou-se este procedimento.

Os graus de risco foram estabelecidos conforme a proporção de cicatrizes por classes de variáveis e a existência de ocupação nestas classes. Os critérios foram baseados nos autores: Dikau (1990), Gao e Lo (1995), Fernandes e Amaral (1996), Walsh e Butler (1997) e Guimarães et al. (1998). A combinação dessas variáveis serviu de base para um teste de classificação de graus de risco, dividindo-os em: Baixo, Baixo-moderado, Moderado, Moderado-alto, Alto, Muito alto (Apêndice B9). Deve-se enfatizar que a classe de formas de vertentes, por ter sido incluída como polígonos isolados (abrangendo apenas os pontos com cicatrizes) e não como uma grade cobrindo toda a área, tornou-se muito restritiva não sendo, por isso, considerada para todas as classes de risco.

Não há para a área de estudo dados de solo em escala de detalhe necessária para os objetivos deste trabalho. O mesmo ocorreu para dados referentes a campo de ventos e de pluviosidade, inviabilizando a integração destes com os demais dados obtidos.

CAPÍTULO 5

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos com os procedimentos realizados neste trabalho.

5.1 Pré-processamentos

O erro obtido para o registro, a partir dos pontos de controle selecionados, é de 1,40, o que é considerado aceitável para áreas florestadas, devido à dificuldade na obtenção de pontos de controle nestas áreas. Este erro também está dentro do limite aceitável considerando-se as escalas dos mapas e das imagens e a finalidade do trabalho (Netgis A, 1997).

Os valores obtidos para a atenuação do espalhamento atmosférico apresentados no Capítulo 4 (Tabela 4.4), confirmam que as bandas mais afetadas por ele são aquelas da faixa do visível (TM 1, TM 2 e TM 3) prescindindo as demais deste pré processamento. A imagem resultante desta correção, apesar da redução de sua média, como mostra a Tabela 4.4, não teve seu brilho muito afetado, não se apresentando muito escura.

5.2 Análise das Imagens TM Realçadas por ALC

A técnica de ALC, aplicada nas bandas selecionadas para obter as composições coloridas, apresentou bons resultados, realçando de maneira geral as feições de interesse. Para as bandas 2, 3, 4, 5 e 7 de 1996 os limites máximos e mínimos de histograma utilizados foram, respectivamente: 15-44, 18-85, 4-105, 6-115, 2-63.

Pela análise da Tabela 4.6 (apresentada no Capítulo 4) verifica-se uma alta correlação entre as bandas TM 2 e TM7, TM 3 e TM 7 e TM 5 e TM 7, enquanto entre as bandas TM 2 e TM 5, TM 4 e TM 7 e TM 3 e TM 4 há baixa correlação. As bandas TM 4 e TM 5 (infravermelho próximo e médio) possuem alta variância (Tabela 4.5), o que é esperado

para regiões com densa cobertura vegetal, como é o caso da área de estudo (Chaves, 1992; Florenzano, 1993).

As bandas TM 2, TM 3 e TM 7 mostraram-se bastante apropriadas para a observação de feições antrópicas e de cicatrizes, conforme já indicado por Florenzano (1993). As composições coloridas com as bandas da faixa do visível e do infravermelho próximo e médio destacaram as características e diferenças entre as feições erosivas (cicatrizes), antrópicas e os setores cobertos por vegetação densa. Além disso, através da banda TM 4 visualiza-se melhor a variação espacial em áreas densamente recobertas por vegetação (como é o caso da área de estudo), permitindo o mapeamento de feições lineares como cristas, por exemplo (Florenzano, 1993).

As composições coloridas TM 473 RGB, 1996 e TM 572 RGB, 1996 foram as que mais contribuíram para o realce tanto de feições de cicatrizes como antrópicas. Entretanto, a composição 473 RGB mostrou-se melhor para o destaque e discriminação de cicatrizes com diferentes características. Este resultado deve-se provavelmente ao fato de que o solo apresenta curva de reflectância ascendente a partir da banda 3, tendo seu pico na banda 7 (Figura 4.4, Capítulo 4), possuindo estas duas bandas alta correlação, como pode ser verificado na Tabela 4.7, Capítulo 4. Observa-se, também por esta tabela, que as bandas 3 e 7 têm pouca correlação com a banda 4, o que provavelmente proporciona um melhor contraste entre as áreas com e sem cobertura vegetal. Assim, a composição 473 RGB serviu de base para o mapeamento das cicatrizes e como referência na análise das imagens processadas por razão entre bandas e transformação por componentes principais.

As composições coloridas 572 RGB e 473 RGB permitem observar diferenças existentes na vegetação presente na bacia do rio Santo Antônio e adjacências, como mostra a Figura 5.1. Essas diferenças são representadas por matizes mais claros observados nestes setores. Essas porções claras verificadas na imagem podem indicar a resposta da vegetação que tenha menor porte e, conseqüentemente, pouco sombreamento (como capoeiras, por exemplo) em

relação à mata circundante. Coberturas vegetais como capoeiras podem estar relacionadas a cicatrizes de deslizamentos nas quais houve recomposição da vegetação.

Por outro lado, a elevada intensidade de brilho observada nestes setores pode ser atribuída às variações topográficas do terreno e à posição do sistema sensor e da radiação incidente

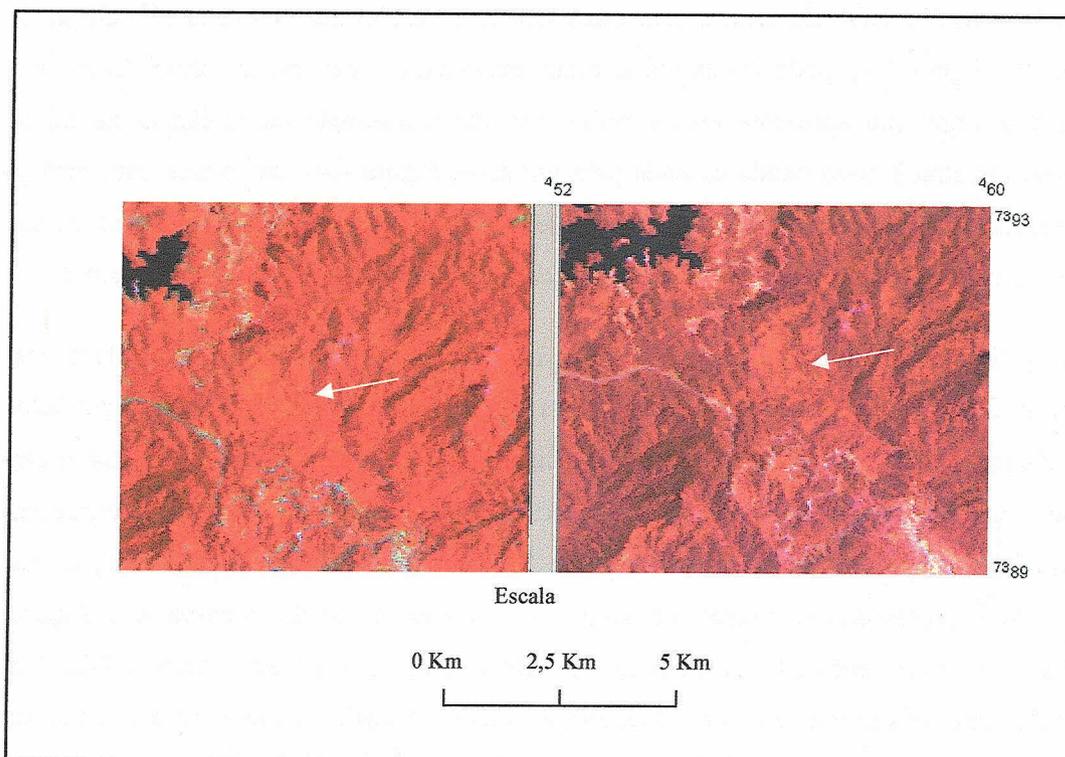


Fig 5.1 - Setor da bacia do rio Santo Antônio, composições coloridas TM 473 e TM 572 (RGB). A seta indica as porções de brilho mais claro nas imagens.

(geometria de aquisição de dados). Como estes fatores levam ao comportamento anisotrópico da radiância, os setores da cena imageada voltados diretamente à luz incidente e ao sensor apresentam radiância mais elevada e, conseqüentemente, maior brilho na imagem, não indicando, necessariamente, diferença de cobertura vegetal (Hugli e Frei, 1983; Brown, 1994; Leprieur et al., 1988). Esta suposição é reforçada ao se observar que os setores de brilho mais elevado estão inseridos na faixa de aspecto de 95° a 100° , o que

corresponde ao ângulo azimutal no qual a imagem foi obtida (98°, Tabela 4.1). A análise da imagem resultante do NDVI, apoia esta explicação, na qual esses setores aparecem em níveis de cinza claros, não se distinguindo da área circundante formada pela mata e não indicando, portanto, diferença de cobertura vegetal.

A composição 572 RGB destaca melhor estes setores de brilho mais elevado em relação à 473 RGB (Figura 5.1), podendo este fato estar relacionado à percepção visual. Como na banda 5 a vegetação apresenta menor brilho (devido à absorção da radiação na faixa espectral registrada nesta banda causada pela umidade, Figura 4.4), os setores com brilho mais elevado tornam-se mais contrastados e melhor percebidos pelo sistema visual. Já na banda 4 a vegetação apresenta alta resposta, tendendo a homogeneizar os níveis de cinza.

Como enfatizado anteriormente, a composição TM 473 RGB destaca as diferenças observadas entre as cicatrizes. As cicatrizes que aparecem em verde amarelado e amarelo nesta composição (Figura 5.2), apresentam rocha de base exposta, o que foi verificado em campo e por fotografias aéreas coloridas, na escala de 1:5000. A análise da curva espectral obtida para estes pontos mostra altos valores de ND's a partir da banda TM 4, com pico na banda TM 5, decrescendo em direção a banda TM 7, como verificado na curva A da Figura 5.3. Este comportamento é típico de rochas quartzosas, como o granito (Drury, 1993). Na área de estudo, tais afloramentos representam cicatrizes de deslizamentos, onde a rocha de base tornou-se exposta. Um estudo mais detalhado das características das cicatrizes (se cobertas por vegetação ou se apresentam rocha de base exposta) pode indicar qual a situação desses pontos com relação aos deslizamentos, já que nos pontos onde há a presença de rocha, é possível que este tipo de processo possa se estabilizar (devido à ausência de regolito) ou surgirem outros tipos de processos, como a queda de blocos, que possuem extensão e magnitude diferentes de deslizamentos.

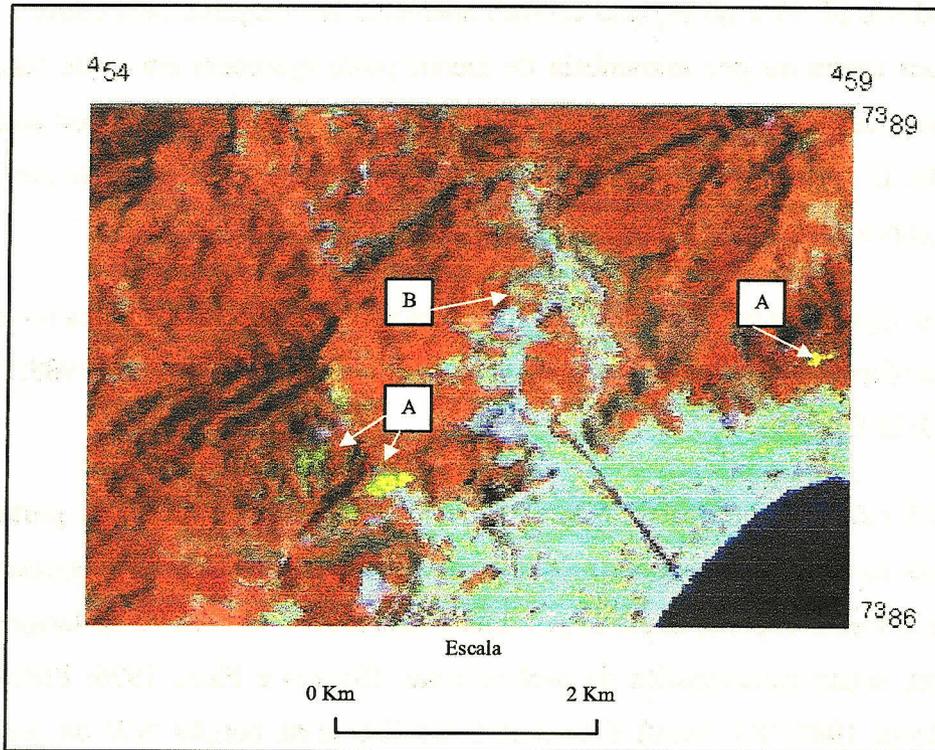


Fig 5.2 - Cicatrizes apresentando rocha exposta (A) e cobertura de capim (B), composição colorida TM473-RGB

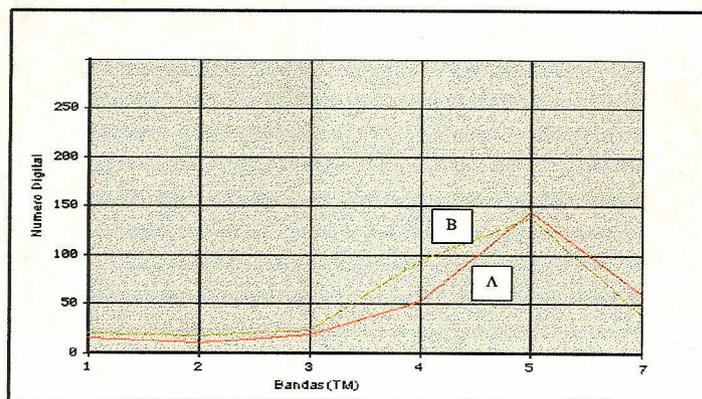


Fig 5.3 - Perfis espectrais dos setores que apresentam rocha exposta (A) e os revestidos por cobertura vegetal em B

Como mostra a imagem da Figura 5.4, algumas das cicatrizes revestidas por samambaia (ao longo da rodovia SP 99 e no espigão central) aparecem em magenta bem claro, e aquelas revestidas por capim ou por samambaia de menor porte aparecem em cyan, tendendo a verde, o que pode indicar provavelmente uma maior integração da resposta do solo com a da vegetação. O perfil espectral extraído da cicatriz coberta por capim pode ser visto na Figura 5.3 (curva B), notando-se sua semelhança com a curva da vegetação.

As cicatrizes registradas na área de estudo aparecem sob forma elíptica, cônica ou irregular, o que está conforme a bibliografia consultada (Soares e Fiori, 1976; Patton, 1988; Zaruba e Mencl, 1982; IPT, 1989).

A Figura 5.5 mostra uma cicatriz recente à data de obtenção da imagem, portanto não observada na fotografia aérea obtida no ano de 1994. Esta cicatriz, que apresenta solo exposto e tem forma elíptica, inicia-se próxima à cabeceira e estende-se ao longo da linha de drenagem, sendo característica de deslizamento. (Soares e Fiori, 1976; Patton, 1988; Zaruba e Mencl, 1982; IPT, 1989). Esta cicatriz localiza-se na porção NW da área e está

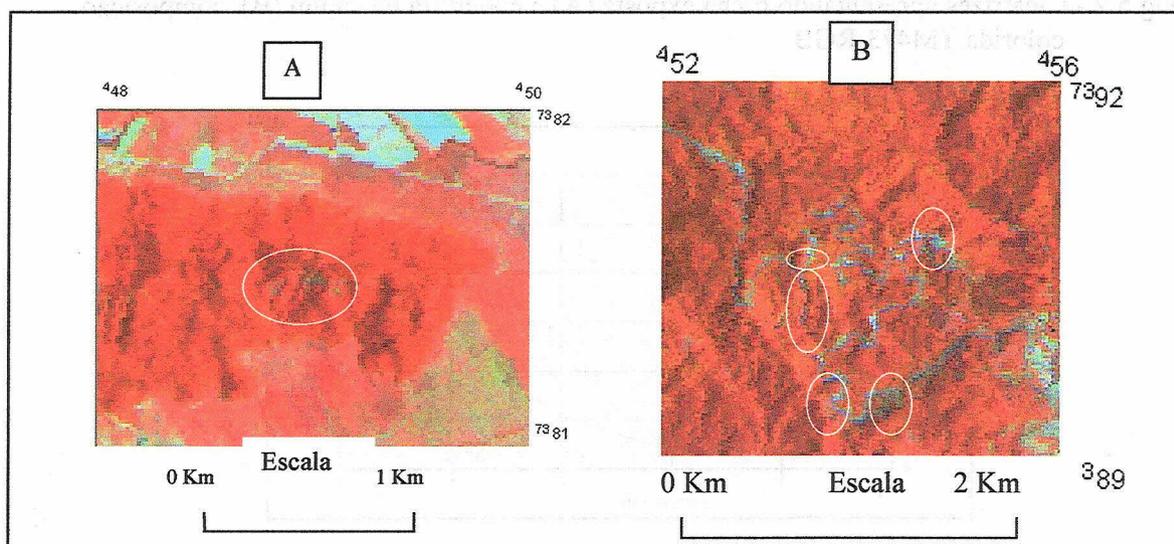


Fig 5.4 - Cicatrizes no espigão localizado na porção central da área de estudo (A) e ao longo da SP 99 (B), composição colorida, TM 473 RGB

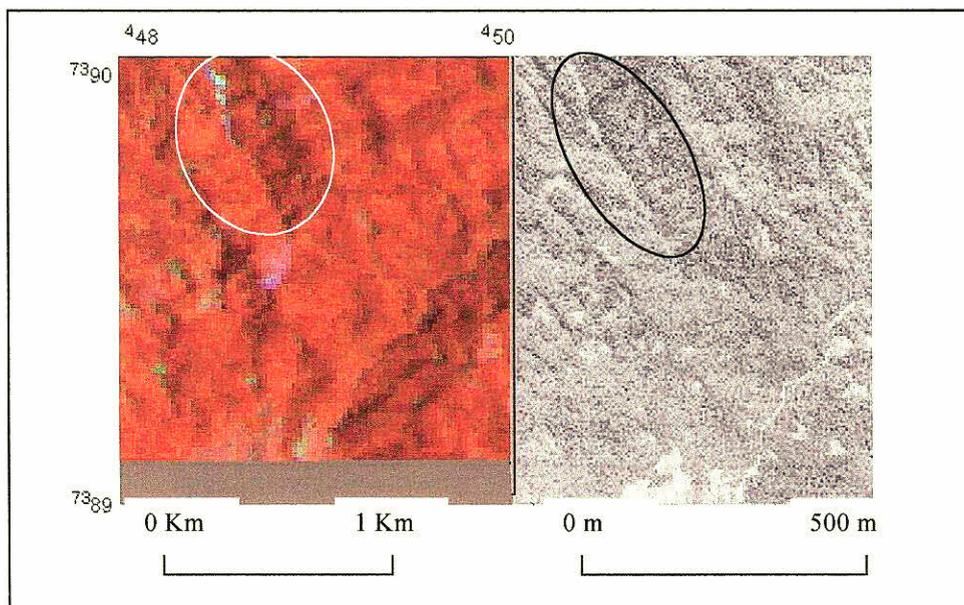


Fig 5.5 - Composição colorida TM, 473 RGB e fotografia aérea vertical pancromática, 1994, do mesmo local. Notar a presença de cicatriz provocada por escorregamento ao longo da drenagem na imagem e ausência desta na fotografia aérea

relacionada provavelmente a deslizamento deflagrado pela elevada pluviosidade ocorrida no ano de 1996.

Foi possível pelo trabalho de campo observar as rampas de tálus, samambaias e capins sobre cicatrizes de escorregamentos, bem como cicatrizes de aspecto côncavo (sugerindo movimentos do tipo *landslides*), algumas próximas à áreas de servidão de linhas de tensão, o que chama a atenção para a possível influência do impacto destas áreas sobre os movimentos de massa e o risco destes processos para estas áreas, como ilustram as Figuras 5.6 a 5.9. As observações de campo garantiram maior segurança na interpretação das imagens e compreensão das variações de cor das composições coloridas realizadas. Através destas composições também foi possível a identificação de vales bem encaixados, onde deposita-se material coluvial e tálus. Estas feições ficam bem destacadas na imagem resultante da multiplicação, discutida na seção 5.4

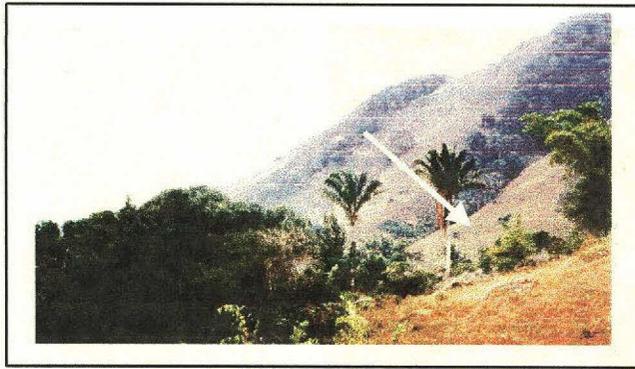


Fig 5.6 - Vista de rampas compostas por material transportado

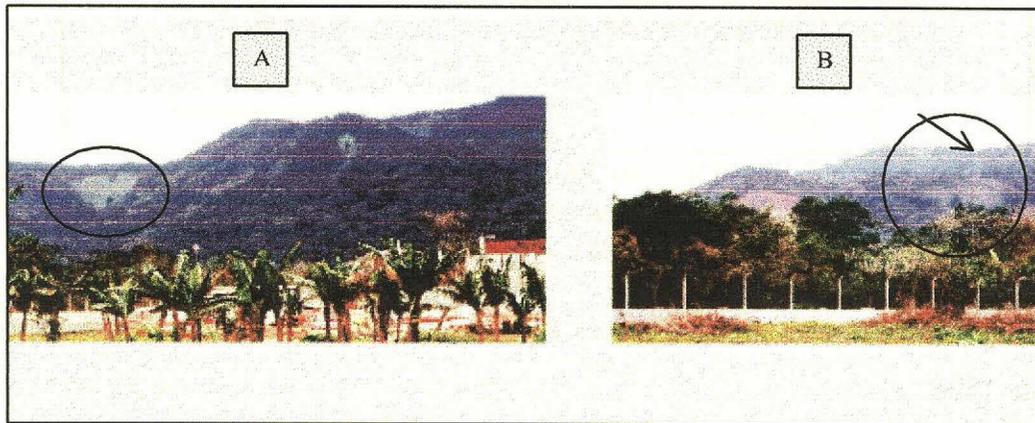


Fig 5.7 - Cicatrizes de deslizamentos. Observe a presença de linha de alta tensão (indicada pela seta na foto B)

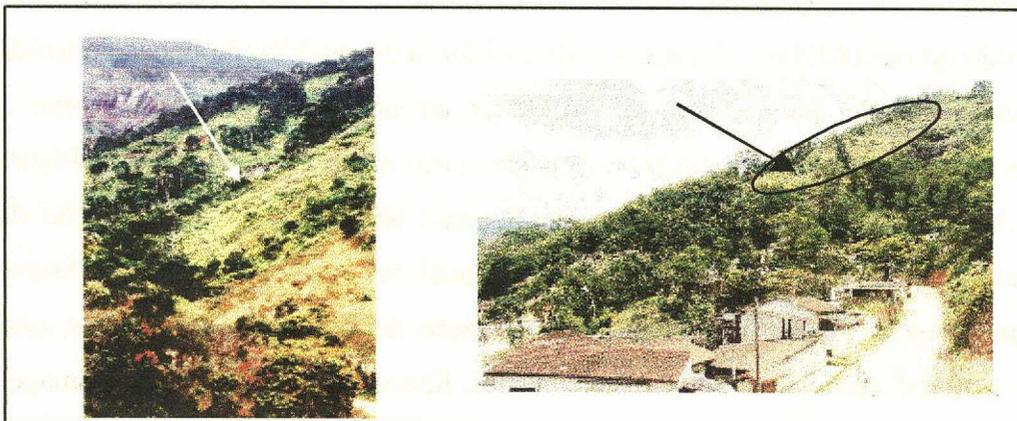


Fig 5.8 - Samambaia sobre antigas cicatrizes

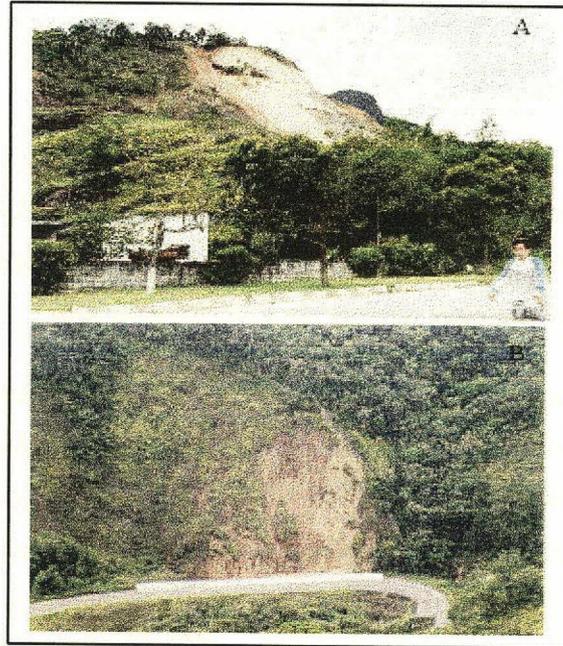


Fig 5.9 - Cicatrizes com solo exposto. A foto B exibe cicatriz próxima a corte de estrada (SP 99)

A composição 473-RGB, auxiliou a interpretação das formas de vertentes, realizada juntamente com o auxílio das curvas de nível e da composição colorida com as imagens resultantes da multiplicação.

A partir da banda TM 5, contrastada por ALC, da composição colorida formada por imagens resultantes da multiplicação (descrita na seção 5.4), e com o auxílio das curvas de nível digitalizadas extraiu-se uma rica informação da rede de drenagem que foi confrontada com o mapa de Okida, 1996. A contribuição da banda TM 5 de 1996 pode ser atribuída à elevada umidade da mata ciliar, destacando, assim, os canais e por não apresentar problemas de sombreamento, como as imagens de 1988.

Os canais temporários foram identificados por possuírem níveis de cinza mais claros que os canais principais, mas mais escuros que a vegetação em torno. Estes canais possuem forma linear e comprimento bem menor que os canais principais. Alguns encontram-se inseridos

em pontos próximos a cabeceiras. A interpretação das imagens em conjunto com as curvas de nível (posicionamento topográfico e crenulamento), permitiu a extração e mapeamento dos canais permanentes e temporários.

Para o realce dos contatos entre as unidades de relevo e a delimitação destas unidades, as imagens que mais contribuíram foram a composição colorida 473 RGB de 1988 (devido ao ângulo solar baixo) e a composição colorida com as imagens multiplicação (1996), sendo que os resultados obtidos para estas últimas são discutidos no item 5.3.

Nas imagens analisadas não se verificaram variações de textura que pudessem ser atribuídas aos diferentes tipos de cobertura vegetal (como pinheiros, capoeiras e mata nativa). Nas fotografias aéreas, ao contrário, percebe-se alguns setores da vegetação que se apresentam com textura mais lisa que a predominante em outros setores (inclusive na bacia do rio Santo Antônio). Esta variação pode ser devida à presença de capoeiras ou de pinheirais, necessitando-se de mais dados de campo para a sua explicação. Variações de textura que possam ser atribuídas a rupturas no dossel devido ao afastamento das árvores, causada por movimentos de massa não foram identificadas. Variações de densidade e de tipo de cobertura vegetal são perceptíveis nas imagens TM pela cor ou tonalidade, como ocorre nas cicatrizes onde a vegetação foi removida, dando lugar à vegetação de porte arbustivo e/ou arbóreo, como ocorre nos samambaias e nos capinzais ou nos setores com solo ou rocha exposta.

5.3 Multiplicação entre Bandas

As imagens de 1996 resultantes da multiplicação foram submetidas a contraste por meio de ALC, o que melhorou sua qualidade visual. A melhor composição colorida obtida com as imagens resultantes da multiplicação é a 5x4 2x4 e 7x4 RGB, o que provavelmente pode ser explicado pela variância da banda TM 4 (segundo maior valor) como observa-se pelas Tabelas 4.3 e 4.5 (Capítulo 4), além de apresentar o mais elevado valor de média (Tabela 4.3), o que indica, respectivamente, destaque da textura e um brilho mais elevado nesta

banda. Com este processamento obteve-se realce nos setores com alta frequência espacial (transição abrupta de níveis de cinza), o que ocorre para as feições lineares como cristas e fundos de vales e nos contatos serra-planície (Figuras 5.10 e 5.11), facilitando a compartimentação de unidades de relevo, o que foi verificado também com as imagens de 1988 (bandas 4 e 5 e composição 473 RGB). São destacados, dessa maneira, vales fortemente encaixados, os quais caracterizam-se como áreas de escoamento e deposição de material removido durante deslizamentos (como o tálus), conforme o mapa Geomorfológico de Cruz (1974). Na Figura 5.10 pode-se observar um desses vales.

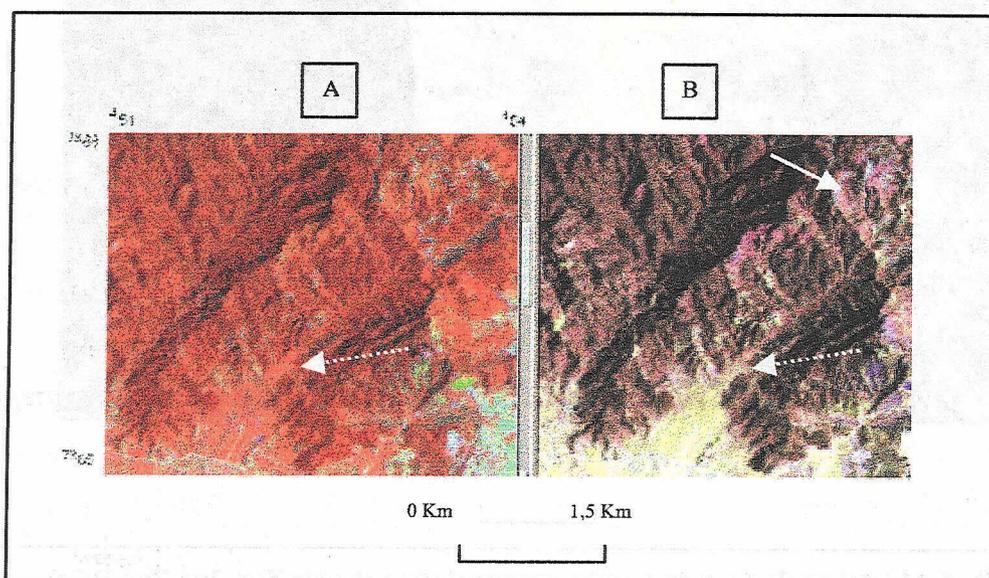


Fig 5.10 - Composições coloridas TM 473 RGB (A) e 5x4 2x4 7x4 RGB (B). Notar realce de textura e a perda de informação para estrada (seta cheia em B). Notar vale encaixado onde ocorre depósito de tálus (seta tracejada)

Em vertentes menos sombreadas verificou-se o destaque da drenagem instalada sobre elas, o que auxiliou a interpretação e mapeamento da drenagem para estes setores. Porém, nas vertentes mais sombreadas houve perda de informação para a drenagem em relação à TM5. Nestas vertentes houve redução da variação de níveis de cinza e consequente homogeneização da textura, predominando os níveis de cinza mais escuros, o que encobriu

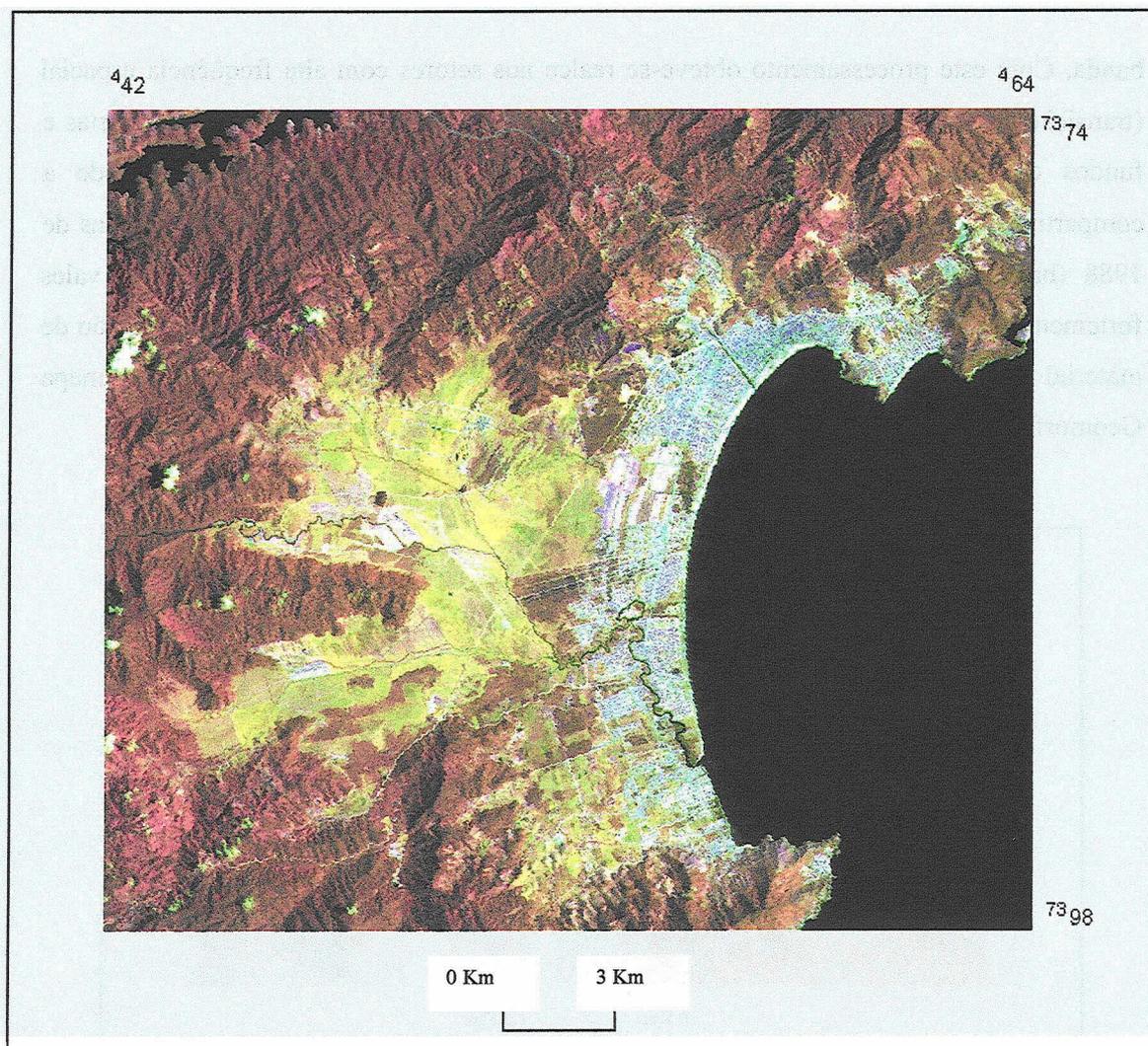


Fig 5.11 - Vista da área de estudo, composição colorida 5x4 2x4 7x4 RGB

a resposta dos canais de drenagem e ravinas. As imagens resultantes da multiplicação permitiram também a análise das formas de vertentes.

Para a informação relativa a estradas, entretanto, verificou-se que esta ficou prejudicada, como em alguns trechos da SP 99, por exemplo, onde a imagem se mostra confusa, (Figura 5.10), o que pode ser atribuído provavelmente ao sombreamento ou à alguma característica relacionada ao comportamento deste alvo nas bandas envolvidas na multiplicação.

Os resultados obtidos com a multiplicação podem ser atribuídos à redundância de dados na imagem, por serem alguns destes dados comuns às várias bandas envolvidas na operação. À medida que o valor do ND se aproxima entre uma banda e outra (ou seja quanto maior a correlação), mais realçada fica a intensidade deste valor ao se efetuar a multiplicação.

Assim, a multiplicação realçou o sombreamento (o qual é altamente correlacionado em todas as bandas), conforme o esperado (Crosta, 1993; Crosta, 1998).

5.4 Razão entre Bandas

As imagens resultantes das operações de razão entre bandas destacaram feições antrópicas e de cicatrizes.

A razão TM 4/3 e a imagem NDVI contrastadas por ALC permitiram distinguir áreas com escassa vegetação daquelas completamente desprovidas de cobertura vegetal (conforme constatado em campo e por fotografia aérea). Os setores da cena com escassa cobertura vegetal, como aqueles referentes às cicatrizes, aparecem em tons de cinza médio escuros e os setores urbanizados ou de solos totalmente expostos como, por exemplo, áreas de empréstimo de areia, apresentam pixels cinza escuro. O resultado mais importante deste processamento foi o destaque de estradas e áreas desmatadas em geral, como ilustram as Figuras 5.12 a 5.15.

Como pode ser verificado nas Figuras 5.12 e 5.13, alguns alvos urbanos, como arruamentos e estradas, são melhor discriminados nas imagens resultantes da razão entre bandas do que na composição 473 RGB.

Também são realçados setores com solo exposto em relação às áreas construídas, como pode ser observado na Figura 5.14. Na área mostrada nesta figura foi constatado em trabalho de campo queda de blocos (Tabela 4.3, Capítulo 4). Este tipo de processo não pôde ser identificado através dos dados de sensoriamento remoto utilizados. A diferença entre as

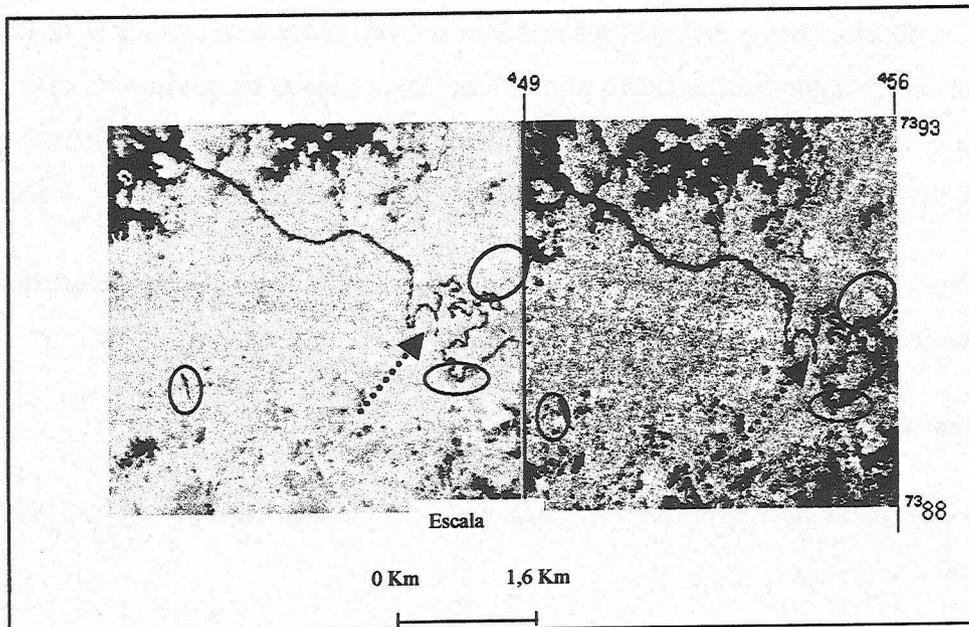


Fig 5.12 - Imagem NDVI e razão 4/3. Os círculos indicam cicatrizes resultantes de deslizamentos. A seta pontilhada aponta cicatriz que teve maior destaque em relação à composição colorida TM 473 RGB

cicatrizes que se apresentam revestidas por samambaia ou capim e as que apresentam rochas expostas é percebida tenuamente. Nota-se uma gradual redução no brilho das primeiras áreas para as últimas, como pode-se observar na Figura 5.14. A não distinção entre áreas cobertas por samambaia das áreas cobertas por capinzal nas imagens TM 4/3 e NDVI deve-se provavelmente à similaridade de resposta espectral destas, pois a razão elimina as diferenças existentes entre alvos cujo albedo é diferenciado mas cujo comportamento espectral seja semelhante. Esta semelhança pode ser devido ao pouco vigor e ao pequeno porte da cobertura vegetal presente nos setores cobertos por estes tipos de vegetação e às características do solo.

O mesmo fato ocorre para a composição 5/7 4/3 4/1 RGB com relação às cicatrizes que apresentam rocha exposta das que estão cobertas por capim (Figura 5.15). A diferença entre cicatrizes que apresentam rocha exposta e as cobertas por capinzal ou samambaia tem melhor distinção na composição 473 RGB, na qual estes alvos se distinguem pela cor,

como já exposto no item 5.2. Ao se analisar a Figura 5.3 observa-se semelhança no comportamento da curva espectral entre estes dois tipos de cicatrizes, pois ambas

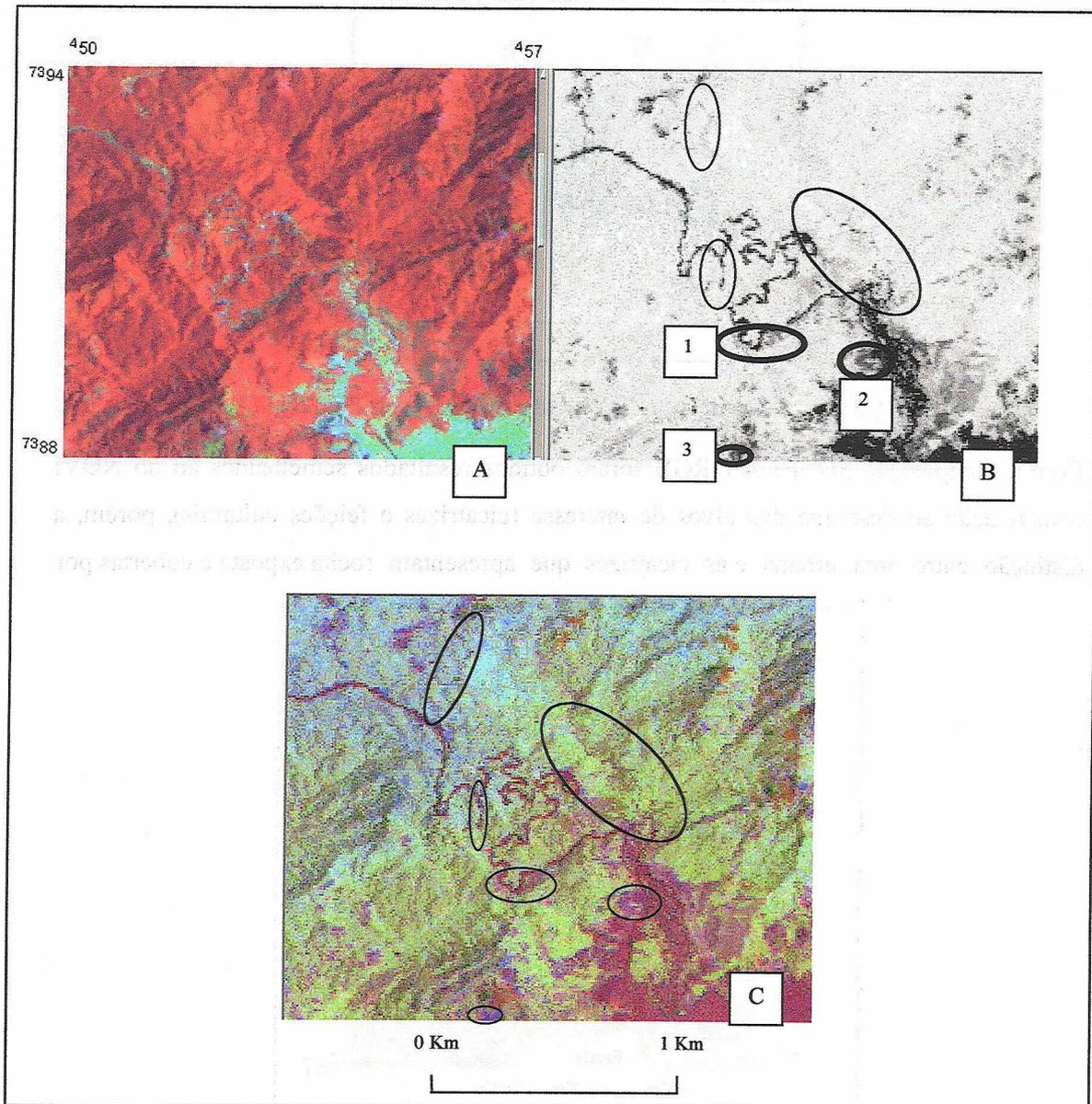


Fig - 5.13 Composição colorida 473 RGB, (A); imagem NDVI (B) e composição colorida 5/7,4/3,4/1 RGB (C). Os círculos indicam alvos destacados em relação à composição. Os círculos cheios em B indicam cicatrizes cobertas por samambaia (1), capim (2) e que apresentam rocha de base exposta (3).

apresentam ascensão da curva a partir da banda 3 e declínio da banda 5 para a banda 7.

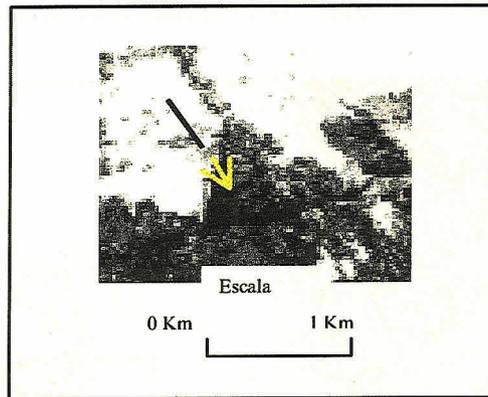


Fig 5.14 - Área de solo totalmente exposto (seta), imagem NDVI

Com a composição 5/7 4/3 4/1 RGB foram obtidos resultados semelhantes ao do NDVI com relação ao destaque dos alvos de interesse (cicatrices e feições culturais), porém, a distinção entre área urbana e as cicatrizes que apresentam rocha exposta e cobertas por

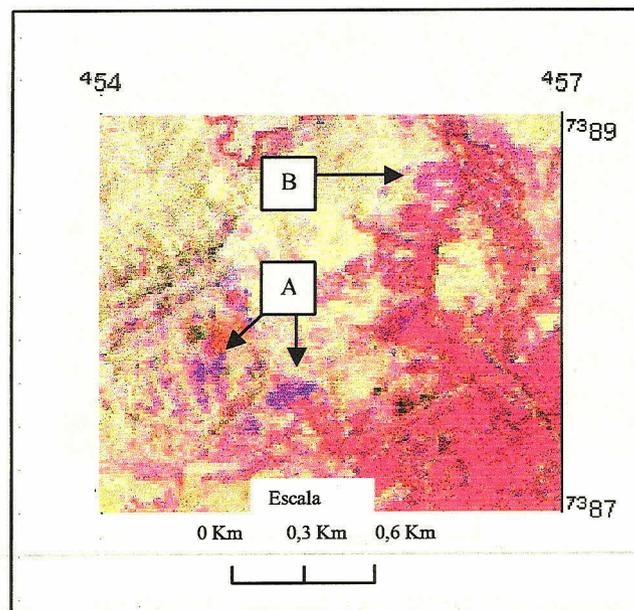


Fig 5.15 - Composição colorida 5/7 4/3 4/1 RGB. Observar semelhança entre cicatrizes em rochas expostas (A) e área coberta por capim (B).

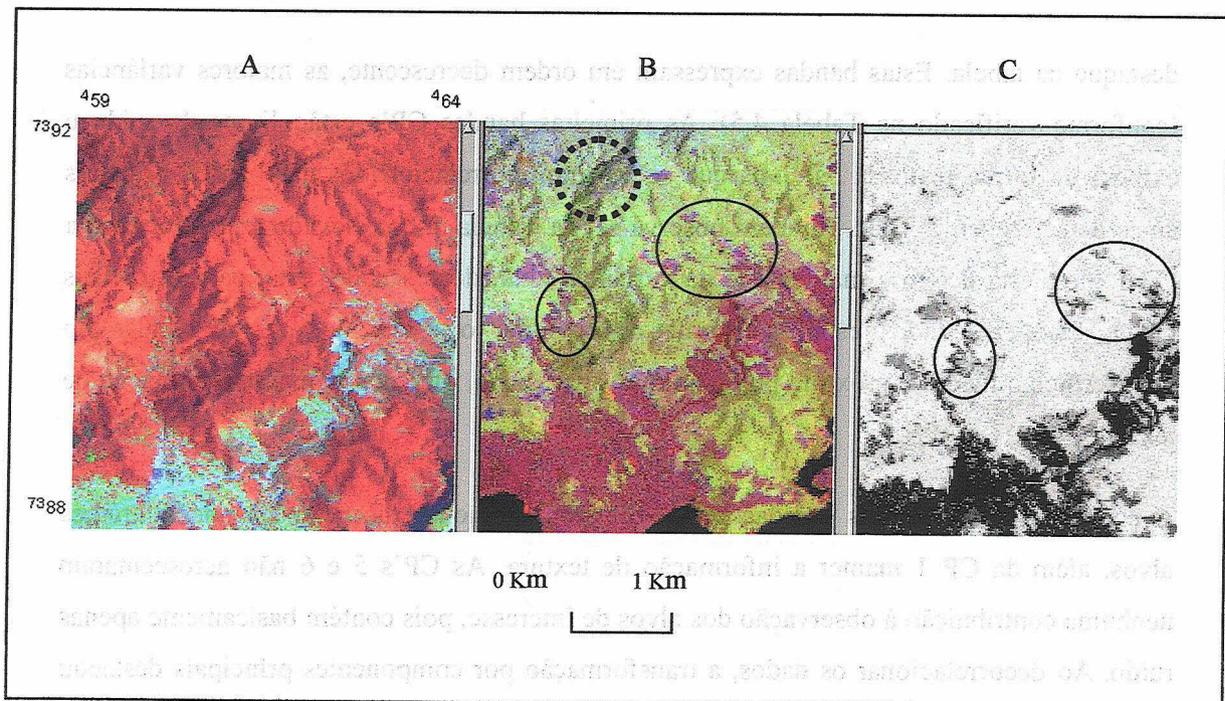


Fig 5.16 - Composição colorida TM 473 RGB (A); composição colorida 5/7 4/3 4/1 RGB (B) e imagem NDVI (C). Os círculos indicam alvos destacados. Notar realce de elemento linear (estrada) em B com relação a C (círculo pontilhado).

samambaia é percebida pela diferença de brilho e cor (magenta escuro, magenta claro e cyan respectivamente) o que favorece visualmente a discriminação entre esses diferentes alvos em relação ao NDVI ou à razão 4/3 (Figura 5.13). Há semelhança na resposta entre as cicatrizes cobertas por capinzal e as que apresentam rocha exposta, como já citado. A composição 5/7 4/3 4/1 RGB também destacou pequenas estradas em alguns setores da cena, como pode-se ver na Figura 5.16 B. Isso ocorre provavelmente devido à combinação dos elementos destacados por cada razão utilizada na composição (5/7, 4/3 e 4/1).

5.5 Transformação por Componentes Principais (TCP)

Pela matriz de auto-vetores (Tabela 5.1) pode-se verificar que as bandas geradas pelas CP's 1, 2, 3 e 4 têm maior contribuição das bandas originais 5 (0,728 para a CP 1), 4 (0,643 para a CP 2), 7 (0,081 para a CP 3) e 1 (0,53 para a CP 4), cujos valores são mostrados em

destaque na tabela. Estas bandas expressam em ordem decrescente, as maiores variâncias (conforme verificado na Tabela 4.5). As primeiras bandas CP's estão livres de ruído e exibem de forma realçada os alvos que se mostram correlacionados nas bandas originais antes de se efetuar a TCP. Também observa-se, na Tabela 5.2, o elevado autovalor para a CP 1 (pois esta detem a maior parte da variância total, decrescendo, esta, para as demais CP's). Estes resultados estão conforme o esperado, ou seja, de que as bandas do infravermelho médio e próximo possuem maior variância, oferecendo maior informação de textura.

A combinação das bandas geradas pela TCP proporcionou a discriminação de diferentes alvos, além da CP 1 manter a informação de textura. As CP's 5 e 6 não acrescentaram nenhuma contribuição à observação dos alvos de interesse, pois contém basicamente apenas ruído. Ao decorrelacionar os dados, a transformação por componentes principais destacou nas imagens resultantes alguns alvos, principalmente estradas e arruamentos.

TABELA 5.1 MATRIZ DE AUTOVETORES – IMAGEM TM 1996

CP's Bandas	1	2	3	4	5	6
1	0,031	-0,365	-0,623	0,53	-0,369	-0,246
2	0,074	-0,231	-0,354	-0,007	0,244	0,87
3	0,132	-0,402	-0,338	-0,493	0,543	-0,411
4	0,634	0,643	-0,403	-0,130	-0,069	-0,029
5	0,728	-0,349	0,451	0,348	0,152	-0,012
7	0,210	-0,349	0,081	-0,581	-0,694	0,114

TABELA 5.2 MATRIZ DE AUTOVALORES - IMAGEM TM 1996

CP	Autovalores
1	2697.5234
2	466.4619
3	62.8616
4	11.5856
5	7.9521
6	2.0436

A composição colorida obtida com as CP's 432 (RGB) apresentou melhor resultado do que a composição colorida com imagens razão 5/7 4/3 4/1 RGB para a distinção de alguns alvos, como observado na Figura 5.17, onde verifica-se a separação entre o arruamento e o seu entorno. A composição colorida CP 321 diferencia as cicatrizes que apresentam rochas expostas das cicatrizes cobertas por capim. As primeiras são representadas pela cor magenta enquanto as áreas cobertas por capim aparecem azuladas (Figura 5.18). Além disso a CP 321 mantém informação de textura tanto em relação à composição 5/7 4/3 4/1 RGB quanto à CP 432 RGB.

5.6 Resumo dos Resultados Obtidos Através dos Processamentos

Através das imagens obtidas pelos processamentos adotados foi possível identificar as feições relacionadas aos deslizamentos e localizar as cicatrizes em vários pontos da área de estudo, como nos locais citados na Tabela 4.3. A interpretação das curvas de nível reforçou, também, a interpretação de cicatrizes, indicando declive e configuração de vertentes e auxiliando a análise de contexto. A Tabela 5.3 mostra um resumo da contribuição das imagens utilizadas no realce de feições e alvos de interesse. Observa-se, por esta tabela, que

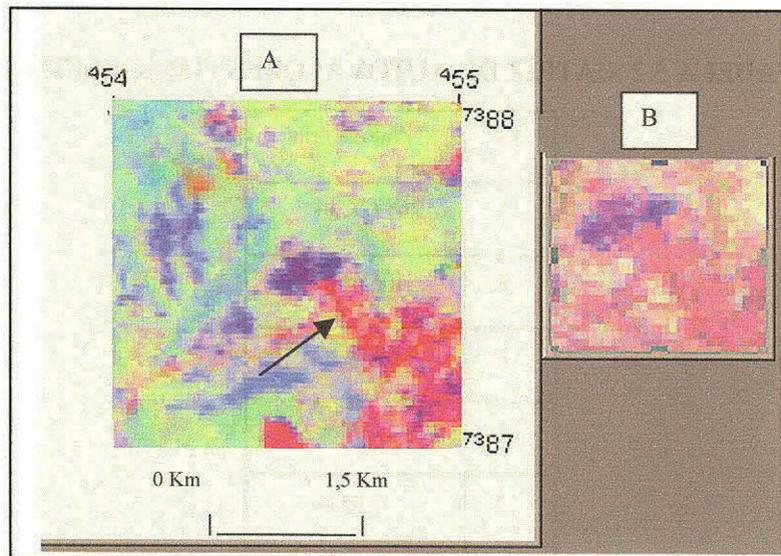


Fig 5.17 - Composição colorida CP 432 RGB (A) e zoom do setor indicado pela seta em A, composição 5/7 4/3 4/1 RGB (B). Notar a melhor definição de arruamento neste setor em A.

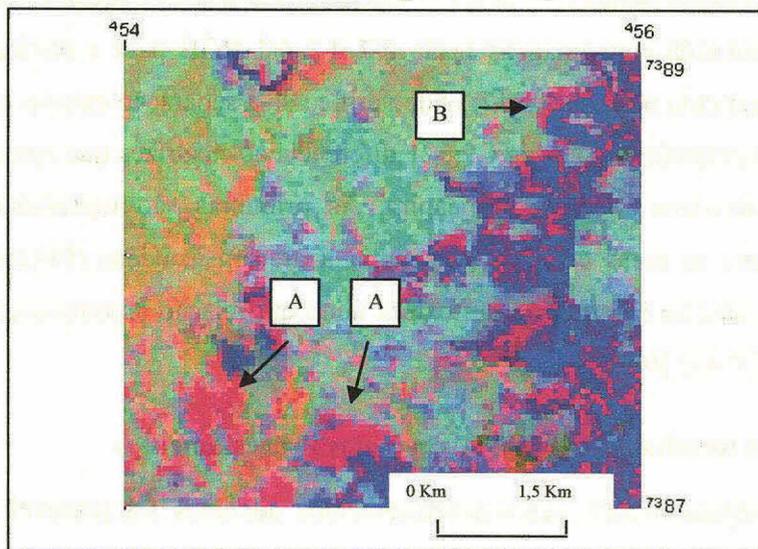


Fig 5.18 - Composição colorida CP 321 (RGB), distinguindo cicatrizes com rocha exposta (A) da coberta por capim (B)

TABELA 5.3 AVALIAÇÃO DAS IMAGENS TM

Imagens	Composição colorida TM 473 RGB, 1988	Composição colorida TM 473 RGB, 1996	Imagem TM 5, 1996	Composição colorida 5x4 2x4 7x4 RGB, 1996	Imagem NDVI	Composição colorida CP 321 RGB, 1996	Composição colorida CP 432 RGB, 1996
Feições/ alvos de Interesse							
Realce de cicatrizes entre cicatrizes afloramentos rochosos, solo e cobertas por vegetação	Regular	Regular	Fraco	Fraco	Bom	Bom	Fraco
Realce de feições antrópicas	Regular	Bom	Não discriminado	Fraco	Fraco	Regular	Regular
Discriminação entre áreas urbanizadas e solo exposto	Fraco	Regular	Fraco	Regular	Bom	Bom	Regular
Discriminação entre feições antrópicas	Fraco	Fraco	Não discriminado	Fraco	Bom	Regular	Bom
Drenagem	Regular	Regular	Não discriminado	Regular	Regular	Regular	Bom
Contatos entre unidades de relevo	Fraco	Regular	Bom	Bom	Não destacado	Regular	Fraco
Formas de vertentes	Bom	Regular	Regular	Bom	Não destacado	Fraco	Fraco
	Regular	Bom	Fraco	Bom	Não destacado	Fraco	Fraco

a composição CP 321 RGB contribuiu tanto para o realce quanto para a discriminação das cicatrizes. Também ficaram realçadas as feições antrópicas nesta composição, mas a discriminação entre elas é melhor observada na composição CP 432 RGB. A composição 473 RGB é a que mais contribuiu para a discriminação das cicatrizes e a composição 5x4, 2x4, 7x4 RGB contribuiu para destacar feições de relevo, além de conter informação de drenagem e formas de vertentes.

As cicatrizes estão distribuídas nos setores central, nordeste e oeste da área de estudo (Figura 5.19), onde é elevada a frequência de fraturas (Okida, 1996), fator este que

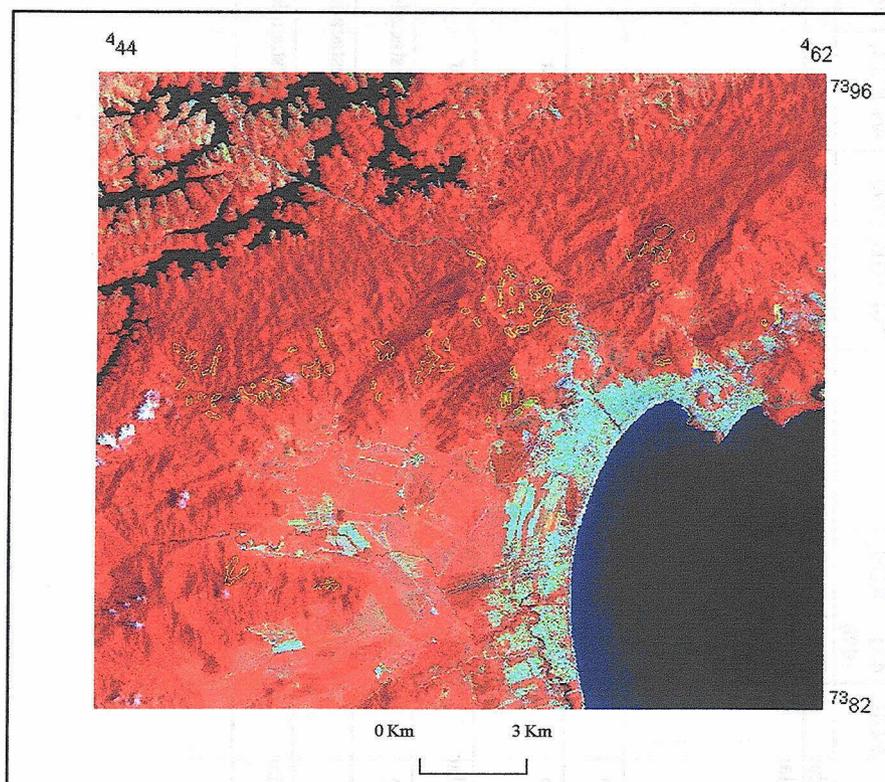


Fig 5.19 - Cicatrizes de deslizamentos identificadas na área de estudo (plano de informação superposto à composição colorida 473-RGB,)

contribui para a ocorrência de deslizamentos. Observa-se também que a maior parte dos setores onde estão inseridas as cicatrizes pertencem às escarpas em anfiteatro, nas quais predominam as vertentes côncavas, o que também favorece a ocorrência de deslizamentos.

5.7 Geração Automática de Carta de Risco

A introdução de isolinhas e pontos para remover os artefatos criados nas áreas planas presentes na área de estudo não eliminou por completo, mas reduziu consideravelmente a sua ocorrência em relação à declividade gerada sem tais isolinhas e pontos. A remoção incompleta desses artefatos deve-se provavelmente à insuficiência dos pontos introduzidos ou à imprecisão do interpolador utilizado. Estes artefatos são também observados na carta de hipsometria, representados por pontos brancos. Outro resultado observado devido à introdução de cotas arbitrárias foi o exagero dos dados referentes à orientação de vertentes (aspecto) nos setores da planície e do mar (onde estas cotas foram introduzidas), o que gerou uma "confusão visual" nestes setores, para a carta de aspecto gerada (Apêndice C1).

Pela análise dos resultados mostrados na Figura 5.20 A observa-se o predomínio da classe 700-900 para hipsometria na área de estudo, mas a ocorrência de cicatrizes predomina na classe 100-300, seguida de 500-700. Estas faixas correspondem a setores da escarpa, enquanto a classe 700-900 se encontra predominantemente no planalto (Apêndice C2). A faixa que abrange os intervalos de 100m a 700m corresponde a setores de elevada altitude e também de elevada altura, formados por vertentes íngremes (a elevada amplitude quando relacionada à elevada declividade, favorece movimentos de massa). A classe que abrange os valores de 900m e acima corresponde às cotas altimétricas existentes no planalto e inclui áreas de morros, morrotes ou colinas. Esses morros, morrotes ou colinas apresentam elevada altitude mas pequena altura (Florenzano, 1993). Assim, em muitos dos setores que apresentam elevado valor de altitude, as cicatrizes ou não ocorrem ou são de pequena extensão, por serem estes setores caracterizados por vertentes pouco extensas e de baixa altura e declividade. Cabe salientar que o algoritmo utilizado para o fatiamento considera o nível de base geral.

As faixas de declive que predominam na área, conforme pode ser observado na Figura 5.20 B, são 0°-3° seguida de 17°-22°, mas as faixas que apresentam maior ocorrência de cicatrizes vão de 17° a 32°, seguidas por 12°-17° e 32°-37°, o que está conforme a literatura consultada. Também deve-se observar que, na faixa de declividade cujos valores abrangem de 12° a 30° há depósitos de tálus que podem ser desagregados em períodos de elevada

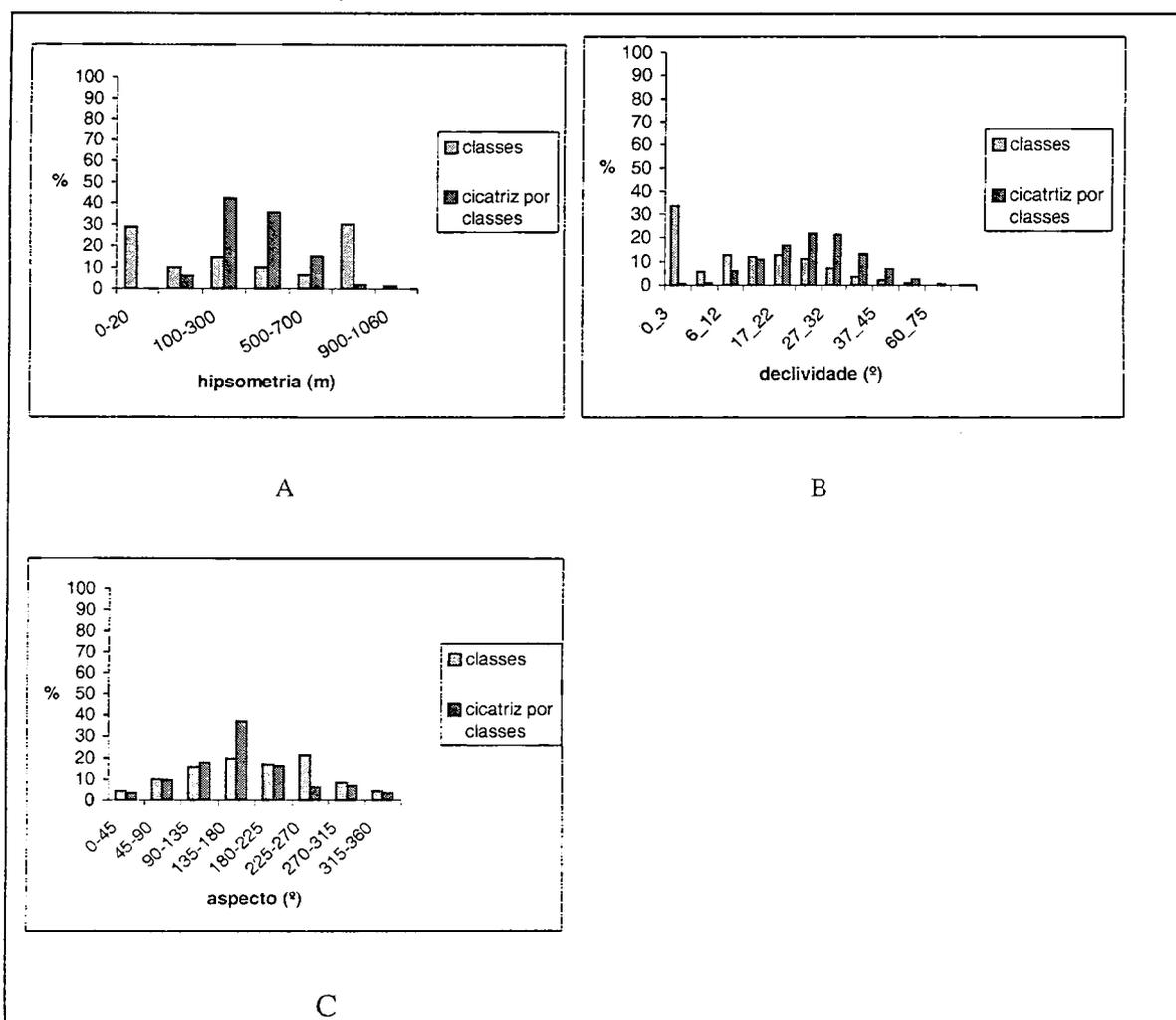


Fig 5.20 Proporção de cicatrizes por classes morfométricas

pluviosidade, servindo de material fonte aos movimentos de massa, como já destacado nos Capítulos 2 e 3. No caso específico de Caraguatatuba, e mais precisamente na bacia do rio

Santo Antônio, Cruz (1975) constatou que as faixas de declividade preferencialmente atingidas por movimentos de massa foram as maiores que 22°, seguidas das faixas 17°-22° e 12°-17°. Com o detalhamento das faixas superiores a 22° aqui realizado, verifica-se que a faixa de 32°-37° apresenta quase a mesma proporção de cicatrizes que a faixa de 12°-17°, sendo a ocorrência desta última faixa maior em relação à primeira. Nas faixas de 37° a 45° ocorre uma camada de regolito que, mesmo sendo delgada, serve como fonte de material a ser mobilizado durante os deslizamentos. O dossel da cobertura vegetal é menos denso nesta faixa, o que torna o solo sujeito a maior impacto da pluviosidade e conseqüentes movimentos de massa, daí, provavelmente, essa faixa apresentar algum percentual de cicatrizes.

Com relação ao aspecto, como pode ser observado na Figura 5.20 C, a ocorrência de cicatrizes é dominante nas faixas de 135°-180° (SE), seguida de 90°-135° (E) e 180°-225° (S). As faixas S e E apresentam quase a mesma proporção de cicatrizes. Aqui provavelmente verifica-se a relação com a exposição à umidade trazida por ventos e massas úmidas provenientes do Oceano, bem como à menor exposição à insolação (nas vertentes situadas a S). Essas condições favorecem o encharcamento do solo e conseqüentes movimentos de massa.

Com relação à geologia local, o ângulo de mergulho predominante das camadas é vertical e subvertical, não apresentando assim orientação preferencial em relação ao mergulho destas camadas (Okida, 1996). A área apresenta maior frequência de fraturas na direção E-W, o que pode favorecer a ocorrência de deslizamentos e também explicar a proporção alta de cicatrizes a E e a SE.

Com relação às formas de vertentes, as que apresentaram a maior frequência de cicatrizes foram as côncavas e as convexas, sendo que estas últimas apresentaram ocorrência de cicatrizes ligeiramente maior em relação às côncavas, como pode ser observado na figura 5.21. Este resultado pode estar relacionado ao fato de que as formas convexas onde as cicatrizes foram mapeadas estão associadas a elementos côncavos das vertentes, o que

ocorre nos setores onde há ocorrência de cicatrizes (estas estão distribuídas predominantemente nas escarpas em anfiteatro, setores com predominância de vertentes côncavas). Também pode-se atribuir o resultado à pouca precisão na interpretação visual das formas de vertentes realizada neste trabalho.

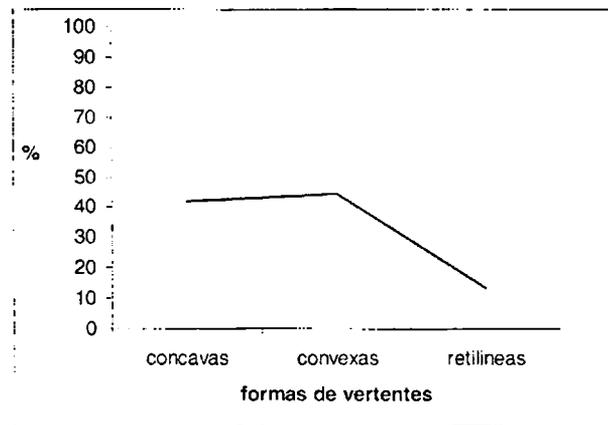


Fig 5.21 Proporção de cicatrizes por formas de vertente

As unidades de relevo compartimentadas estão apresentadas na Figura 5.22 e descritas na Tabela 5.4. Com relação aos índices morfométricos mostrados nesta tabela, os intervalos de classe foram estabelecidos conforme apresentado no Capítulo 4 (Tabela 4.8).

As unidades L, M e P apesar de terem sido classificadas por suas características morfométricas da mesma forma que as unidades S, N e G, respectivamente, foram mantidas separadas por apresentarem características morfográficas diferenciadas. A unidade L localiza-se no planalto e é composta por morros de pequenas dimensões esparsamente distribuídos, enquanto a unidade S é composta por um único morro, de dimensões maiores que os morros referentes à unidade L, e de forma convexa. As unidades N e P são formadas por escarpas em espigão, enquanto as unidades M e G compõem-se de escarpas em anfiteatros.

A elevada quantidade de canais de primeira ordem e de ravinamentos conferem uma alta densidade de drenagem para a área estudada, como se observa na Figura 5.22. Como já

TABELA 5.4 CARACTERÍSTICAS DAS UNIDADES DE RELEVO

Unidades de relevo	Densidade de drenagem (Km/Km ²)	Amplitude altimétrica (m)	Declividade Dominante (°)
A	M°	B	M
B	A	M	A
C	A	AA	AA
D	MA	MA	A
E	M	B	B
F	A	B	M
G*	A	AA	MA
H	MA	B	M
I	B	B	MA
J	MA	AA	A
L*	B	B	B
M*	A	AA	A
N*	A	AA	A
O	A	AA	M
P*	A	AA	MA
Q	AA	A	A
R	A	A	A
S*	B	B	B

* Unidades com características morfométricas iguais mas com morfografia diferenciada (L≠S, N≠M, P≠G).
 ° B - Baixo, M - Moderado, MA - Moderado-alto, A - Alto, AA - Muito alto

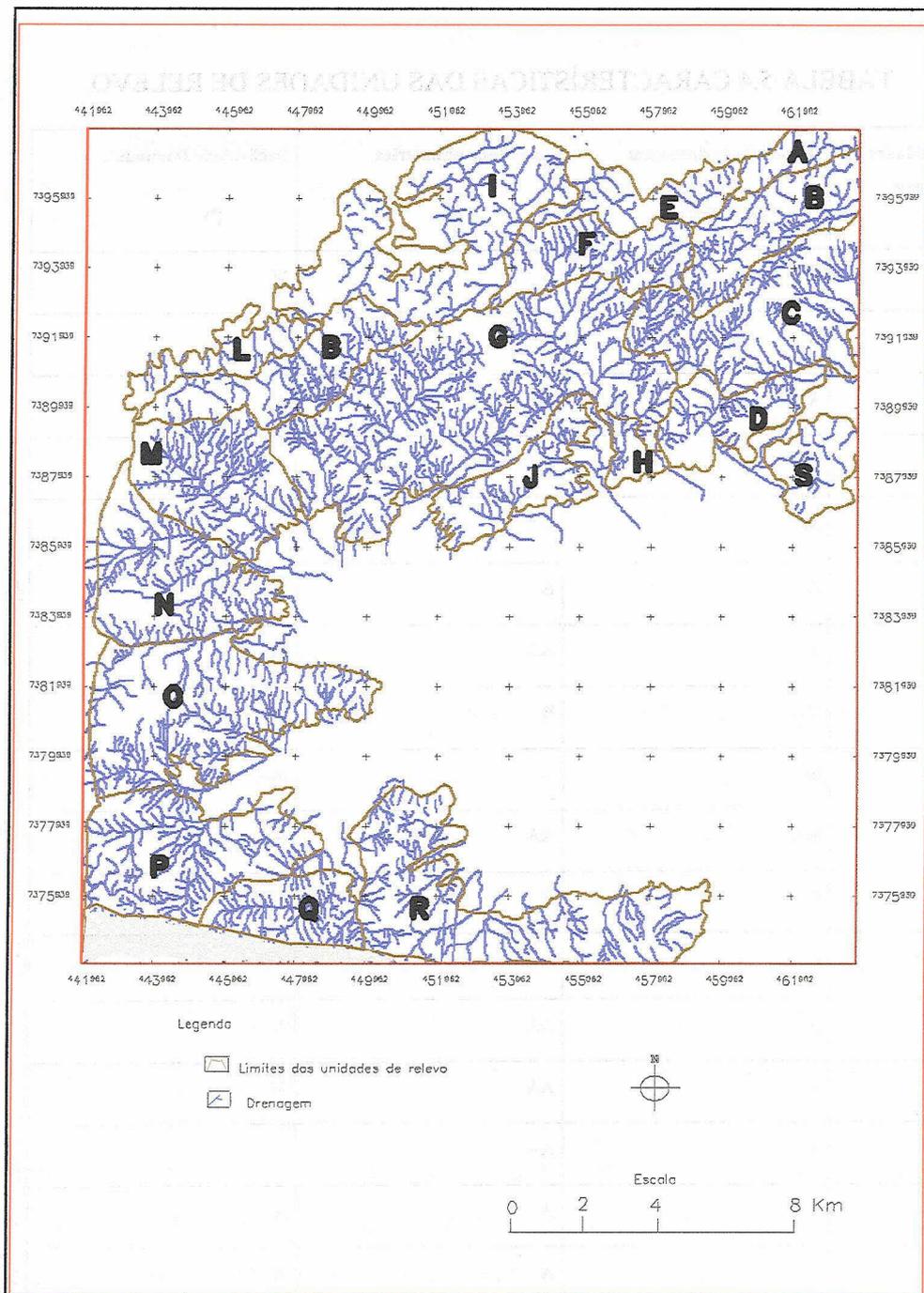


Fig. 5.22 Unidades de relevo e drenagem

desta figura, observa-se que a unidade G apresenta maior proporção de cicatrizes, seguida das unidades M, C, J O e D, respectivamente.

A unidade C apresenta valores Muito alto para amplitude altimétrica e declividade dominante e valor Alto para a dissecação mas apresenta menor proporção de cicatrizes em relação às unidades G e M, que possuem elevados valores de declividade dominante. O aspecto (azimute) das unidades C e G abrange, predominantemente, a faixa de 90° a 135° (Apêndice C1), onde ocorre alta proporção de cicatrizes. Ambas as unidades apresentam ocupação antrópica. Na unidade G são também identificadas feições geomorfológicas que apresentam risco de deslizamentos (rampas de desgaste e tálus). A presença de tais feições (além da ocupação) aliada aos parâmetros morfométricos (incluindo o aspecto) podem explicar a elevada frequência de cicatrizes da unidade G. Tem-se também a possibilidade de que o reflorestamento realizado após a catástrofe de 1967 não tenha surtido o efeito desejado de prevenção aos deslizamentos na área referente a esta unidade, pois o *Pinus* não se desenvolveu de forma satisfatória em alguns setores da área de estudo, como já visto no Capítulo 3. Com exceção das unidade D, as demais unidades apresentam amplitude altimétrica Muito alta. Com relação à dissecação, as três unidades com maior proporção de cicatrizes (G, M e C) apresentam Alta dissecação. A unidade D é a que possui menor proporção de cicatrizes, tendo valores Moderado alto para dois parâmetros, dissecação e amplitude altimétrica.

No geral, as unidades de relevo com elevadas proporções de cicatrizes apresentam valores Muito alto e Alto para a dissecação, amplitude altimétrica e declividade dominante. Entretanto, nem todas as unidades que apresentaram elevados valores para os índices morfométricos (como a unidade Q) apresentaram cicatrizes, o que indica que o tema deve ser abordado considerando-se a interação de diversas variáveis.

As cicatrizes concentram-se nas unidades caracterizadas por escarpas em anfiteatro, onde há predominância de vertentes côncavas, com exceção da unidade O que é formada por

ênfâtizado no Capítulo 4, os valores considerados para a dissecação (e as outras variáveis morfométricas) como Baixo e Moderado são específicos para áreas com características semelhantes às da área de estudo, que, excluindo os setores referentes ao planalto e planície, apresenta no geral elevados valores para estas variáveis. Dessa forma, as unidades de relevo que apresentam elevados valores para dissecação, amplitude e declividade devem, a princípio, ser as mais críticas em uma área que é, no geral, bastante susceptível a deslizamentos.

As unidades A, I e E localizam-se no planalto e têm dissecação baixa a moderada. As unidades A e E são compostas por morros alongados (a unidade E é formada por morros simétricos de pequena extensão), enquanto a unidade I apresenta morros em meia laranja, esparsamente distribuídos. As unidades N, O, Q, P, R, D e H são formadas por escarpas em espigão. A unidade O é formada por vertentes predominantemente retilíneas. As unidades O, H, G e J apresentam rampas de desgaste e tálus em vários pontos.

As unidades C, M, G, F, B e J caracterizam-se por escarpas em anfiteatro com drenagem paralela e subparalela. A unidade J é formada na porção sul por terraços.

A Figura 5.23 mostra a proporção de cicatrizes em cada unidade de relevo. Pela análise

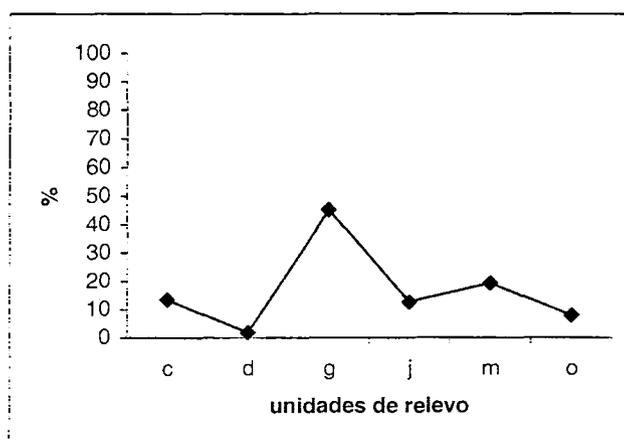


Fig 5.23 Proporção de cicatrizes em cada unidade de relevo

escarpas em espigão, apresentando predominantemente vertentes retilíneas. As cicatrizes mapeadas nesta unidade localizam-se nos pontos de elevada declividade (Apêndice C3).

O zoneamento de áreas de risco obtido através da metodologia adotada neste trabalho pode ser observado na carta de risco da Figura 5.24, sendo descritas, a seguir as classes obtidas.

- Muito alto, Alto e Moderado-alto

Para a classe de risco Muito Alto foram considerados os intervalos de classes de variáveis morfométricas que apresentaram maior proporção (> 10%) de cicatrizes juntamente com as variáveis ocupação e/ou feições geomorfológicas (rampas e tálus) e formas de vertentes. O risco decresce à medida que são excluídas as variáveis de formas de vertentes (Alto) e feições de ocupação (Moderado-alto). Este procedimento foi adotado, conforme Fernandes e Amaral (1996), considerando-se que a ocupação favorece a instabilidade e as feições geomorfológicas consideradas (rampas de desgaste e tálus gerados por movimentos de massa pretéritos) podem representar áreas de recorrência, por serem sujeitas à instabilidade, além de serem indicadores de escorregamentos anteriores. As formas de vertentes não foram consideradas em Alto risco por serem muito restritivas, conforme já salientado, o que tornaria tendencioso o mapeamento.

- Moderado

Para as classes de risco Moderado consideraram-se os intervalos de classes morfométricas menos afetadas por cicatrizes, imediatamente após os intervalos considerados para as classes Muito alto, Alto e Moderado-alto (ou seja, proporção de cicatrizes até 10%). Esta classe considera as feições geomorfológicas, formas de vertentes e ocupação, conforme o mesmo princípio adotado para as classes de risco mais alto.

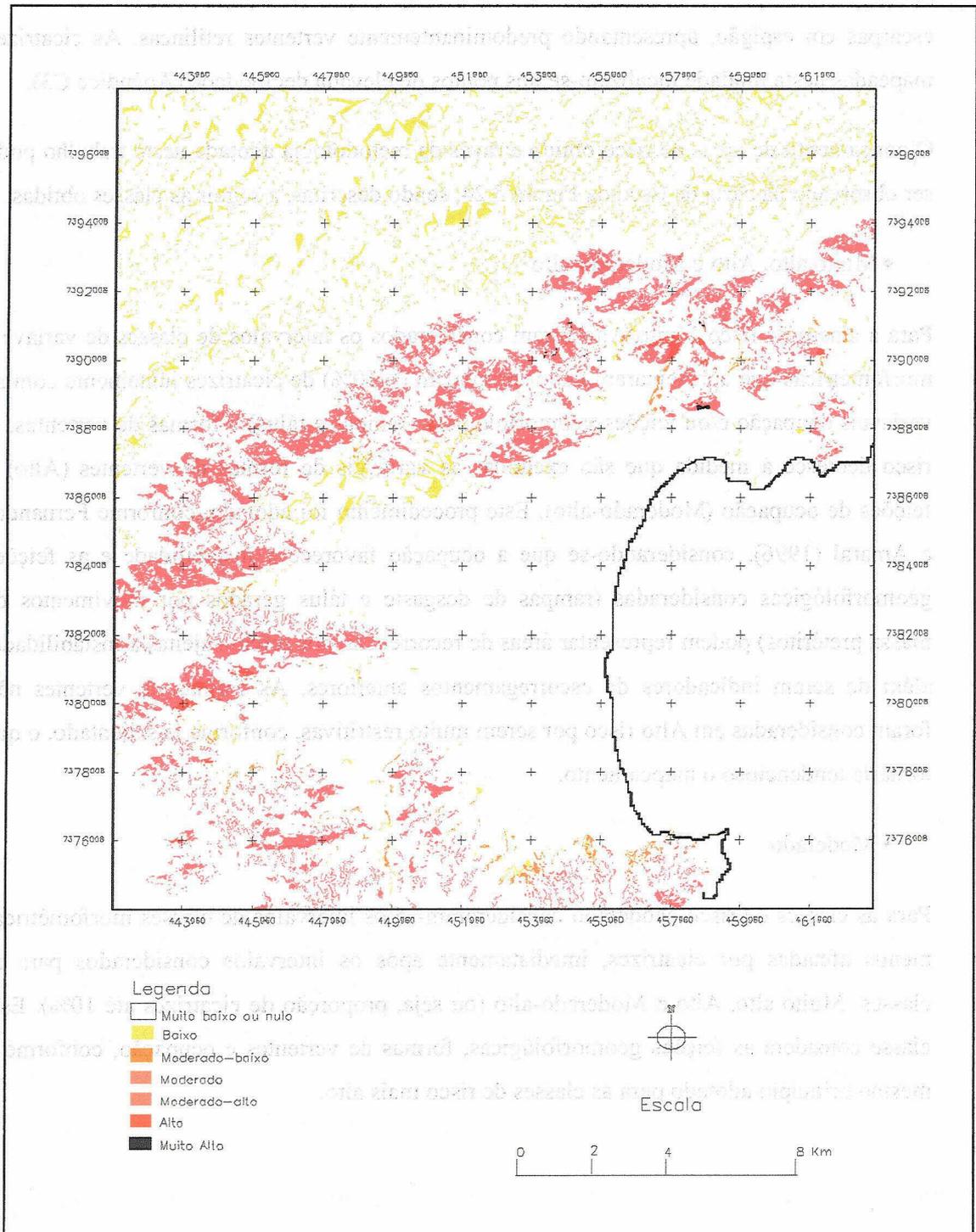


Fig. 5. 24 Carta de áreas risco

- Baixo-moderado, Baixo

As categorias de Baixo-moderado risco, foram estabelecidas pelos intervalos que apresentaram proporção de cicatrizes até 5 % (e desconsiderando formas de vertentes, pelo fato já explicado) e as de Baixo risco pelos intervalos que apresentaram proporção abaixo de 5 %, onde são excluídas as categorias de ocupação e feições geomorfológicas.

- Muito baixo e nulo

Finalmente tem-se as classes de risco Muito baixo ou nulo para os pontos que não apresentaram nenhuma das características consideradas para o estabelecimento de risco.

Os valores selecionados de proporção de cicatrizes para o estabelecimento de graus de risco foram arbitrários, porém apoiados na literatura consultada (principalmente em Gao e Lo, 1995).

Os setores classificados como de risco Muito alto estão distribuídos pelos bairros Jaraguazinho, Benfica e Sumaré (ver Tabela 4.3 e Figura 4.3, Capítulo 4), encontrando-se estes bairros inseridos nas unidades J, G e D. Estes bairros apresentam ocupação em pontos inadequados e são setores críticos, conforme os relatórios elaborados pelo IPT, IG e Comdec.

As classes de risco Muito alto bem como de Alto e Moderado-alto mapeadas neste trabalho estão classificadas por Okida (1996) como sendo de Alto potencial. Assim, as áreas de risco classificadas conforme a metodologia aqui adotada estão de acordo com o zoneamento feito por Okida, 1996. A exceção encontrada foi para um setor localizado no bairro Sumaré (unidade D), que, neste trabalho, recebeu a classificação de Muito alto, enquanto no zoneamento de Okida (1996), encontra-se na categoria de risco Moderado. Este fato pode ser atribuído à ênfase nas variáveis geológicas e ao caráter mais regional do zoneamento feito por Okida (1996), enquanto na metodologia aqui adotada, além de focar as variáveis

morfométricas levou em consideração variáveis de caráter local, como a ocupação do solo e as feições morfológicas de risco. Assim, o mapeamento obtido não apresenta grandes áreas homogêneas quanto aos graus de risco, como sugerido por Varnes (1985), mas áreas com características que as tornam mais ou menos susceptíveis a riscos.

Os resultados obtidos pela metodologia adotada neste trabalho estão coerentes com o zoneamento elaborado por Okida (1996) e com os mapeamentos das áreas críticas realizados pelo IPT e pelo IG, o que confirma a afirmação de Fernandes e Amaral (1996) de que mapeamentos para a definição de áreas de risco elaborados por metodologias diferentes apresentam resultados semelhantes.

CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Os resultados obtidos neste trabalho mostraram-se coerentes com a bibliografia consultada, uma vez que a maior ocorrência de cicatrizes de deslizamentos encontra-se nas faixas de declive, hipsometria e aspecto esperadas. Esses resultados forneceram a base para um mapeamento de áreas que oferecem maior risco a este tipo de processo, sendo que este mapeamento também mostrou-se coerente com o mapeamento realizado através de outras metodologias, como a adotada por Okida (1996).

Através de dados de sensoriamento remoto foi possível observar tanto as feições diretamente relacionadas aos deslizamentos quanto aos indicadores destes processos. Estes dados mostraram-se importantes auxiliares na detecção dos pontos favoráveis aos deslizamentos, fornecendo a base para a definição das classes de risco e conseqüente mapeamento.

Constatou-se, ainda, que um único tipo de processamento é insuficiente para o realce de todas as feições relacionadas às áreas de risco, bem como a necessidade de utilizar dados de sensores com resoluções (espacial, espectral, radiométrica e temporal) mais finas. Neste sentido, novos sensores orbitais que estão sendo desenvolvidos dotados de melhor resolução oferecem boas perspectivas aos estudos relacionados com os movimentos de massa.

Ainda com relação aos processamentos, recomenda-se a transformação da imagem de 1996 em imagem reflectância para uma melhor avaliação da variação observada na vegetação do setor pertencente à bacia do rio Santo Antônio e das áreas referentes a cicatrizes que apresentam diferentes situações (rocha exposta, solo exposto, cobertas por vegetação). É recomendável ainda um trabalho de campo mais detalhado nestes setores.

O uso de fotografias aéreas mostrou-se muito apropriado para a identificação e distinção entre cicatrizes e feições antrópicas. Recomenda-se testar a integração de fotografias aéreas e imagens TM, observando-se a maior proximidade possível da data e do horário da obtenção de ambos.

A utilização de SIG permitiu a extração, cruzamento de dados provenientes de diferentes fontes e obtenção de informações referentes às áreas de risco de movimentos de massa.

É factível a entrada de dados novos no banco de dados em SIG, o que agiliza a atualização de uma informação já existente e permite a rápida geração de novas informações. Assim, por exemplo, dados de solo e clima disponíveis futuramente, podem ser inseridos no banco de dados já montado para este trabalho, permitindo o refinamento do mapa de risco.

É aconselhável um refinamento de cotas introduzidas no MNT a fim de verificar-se a precisão do interpolador e evitar a criação de artefatos computacionais. Recomenda-se também o desenvolvimento de programa para a geração de dados de concavidade e convexidade a partir do MNT.

Com relação à densidade de drenagem, sugere-se o desenvolvimento de algoritmo destinado à geração de grade com valor de densidade de drenagem e posterior fatiamento, como exposto por Weibel e Heller (1994) e Borroughs e McDonell (1998). O mesmo poderia ser aplicado na obtenção da amplitude altimétrica local. Na falta deste algoritmo, é possível a inserção de uma grade, sendo esta digitalizada como polígonos e obtendo-se os valores através dos operadores do LEGAL, de forma a caracterizar com mais detalhe os setores afetados por cicatrizes.

Recomenda-se a quantificação das cicatrizes mapeadas através dos processamentos utilizados e a avaliação da exatidão de mapeamento das cicatrizes. Sugere-se também a análise de correlação para as variáveis morfométricas e as feições de risco a fim de integrar de forma mais precisa os resultados obtidos para a relação entre cicatrizes e as variáveis

consideradas neste trabalho, o que possibilitaria uma classificação mais precisa dos graus de risco.

Com relação às áreas de risco Moderado alto, recomenda-se atenção especial a estas áreas, a fim de evitar ocupação nos locais inadequados, o que poderia deflagrar deslizamentos, passando estas áreas a pertencer à classe de risco Alto. Para a área de estudo como um todo é recomendável o desenvolvimento de técnicas destinadas à recomposição da cobertura vegetal apropriada à contenção de deslizamentos, principalmente nos pontos onde há recorrência de deslizamentos e onde o *Pinus* não se desenvolveu.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ab'Saber, A. N. O domínio dos mares de morros no Brasil. **Geomorfologia**, n. 2. 9 p., 1966.
- Almeida, F. F. M. Os fundamentos geológicos do relevo paulista. **Boletim do Instituto Geográfico e Geológico do Estado de São Paulo**, n. 41, p. 167-262, 1964.
- Aronoff, S. **Geographic Information Systems: a management perspective**. Ottawa: WDL, 1989. 293 p.
- Augusto Filho, O. **Cartas de risco de escorregamento: uma proposta metodológica e sua aplicação no município de Ilhabela, SP**. São Paulo. 172 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 1994.
- Belcher, D. J. Soils. In: Philipson, W. R. ed. **Manual of photographic interpretation**. 2 ed. Maryland: American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, 1997. Cap. 4, p. 167-224.
- Berger, A. R. Geindicator checklist. In: Berger, A. R.; Iams, W. J. ed. **Geoindicators: assessing rapid environmental changes in Earth systems**. Rotterdam: Balkema, 1996. p. 395-454.
- Birkeland, P. W. **Soils and geomorphology**. Oxford: Oxford University Press, 1984. 372 p.
- Bocco, G.; Valenzuela, C. R. Integrating satellite-remote sensing and Geographic Information Systems technologies in gully erosion research. **Remote Sensing Reviews**, n. 7, p. 233-240, 1993.
- Borroughs, P. A.; McDonell, R. A. **Principles of geographic information systems**. 2 ed. Oxford: Oxford University Press, 1998. 313p.

- Bowker, D. E. et al. **Spectral reflectances of natural targets for use in remote sensing**. Washington DC: NASA, 1985. 185 p. (NASA – RP-1139).
- Brown, D. G. Predicting vegetation types at treeline using topography and biophysical disturbance variables. **Journal of Vegetation Science**, n. 5, p. 641-656, 1994.
- Centro Tecnológico de Hidráulica (CTH) **Dados de precipitação dos postos E2-046 e E2-128**. São Paulo, 1997.
- Cerri, L. E. S. **Riscos geológicos associados a escorregamentos**: uma proposta para a prevenção de acidentes. Rio Claro. 197 p. Tese (Doutorado em Geociências e Meio Ambiente) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual de São Paulo, 1993.
- Chaves Jr., P. S. Comparison of spatial variability in visible and near-infrared spectral images. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 58, n. 7, p. 957-964, 1992.
- Chorley, R. J.; Kenedy, B. A. **Physical geography**: a systems approach. London: Prentice-Hall, 1971. 370 p.
- Chorley, R. J.; Schumm, S. A.; Sugden, D. E. **Geomorphology**. Cambridge: Methuen, 1984. 606 p.
- Christofoletti, A. **Geomorfologia**. São Paulo: Edgard Blucher, 1974. 149 p.
- _____ **Geomorfologia fluvial**: o canal fluvial. São Paulo: Edgard Blücher, 1981. 313 p, volume 1.
- Clark, M.; Small, J. **Slopes and weathering**. Cambridge: Cambridge University Press, 1982. 112 p.

- Clowes, A; Comfort, P. **Processes and landforms: an outline of contemporary Geomorphology**. Edinburgh: Oliver & Boyd, 1986. 289 p.
- Comissão de Defesa Civil de Caraguatatuba (COMDEC) **Relatórios técnicos de orientação a áreas de risco**. São Paulo, 1991 a 1996
- Crepani et al. **Curso de sensoriamento remoto aplicado ao zoneamento ecológico-econômico**. São José dos Campos: INPE, 1999. 18 p. (INPE-6145-PUD/028).
- Crosta, A. P. **Processamento digital de imagens de sensoriamento remoto**. Ed. Ver. Campinas: Universidade de Campinas, 1993. 170 p.
- Crosta, A. P. alvaro@ige.unicamp.br **Multiplicação entre bandas** Sestini, M. F. sestini@ltid.inpe.br, 20 ago., 1998 e 10 nov., 1998.
- Cruz, O. **A Serra do Mar e o litoral na área de Caraguatatuba – SP: contribuição à geomorfologia litorânea costeira tropical**. São Paulo, 181p. Tese (Doutorado em Geografia) - Universidade de São Paulo, , Faculdade de Filosofia Letras e Ciências Humanas, Depto Geografia, 1974.
- _____ **Evolução de vertentes nas escarpas da serra do Mar em Caraguatatuba - SP. Academia Brasileira de Ciências**. Suplemento, v. 47, p.479-480, 1975. Simpósio Internacional sobre o Quaternário - Brasil Meridional, Curitiba, Porto Alegre.
- Dikau, R. Derivatives from detailed geoscientific maps using computer methods. **Zeitschrift für Geomorphologie**, v. 2, Supplementband 80, p 45-55, December 1990. 2 International Conference on Geomorphology and Geoecology, Frankfurt, Mai, 1989.
- Drury, S. A. **Image interpretation in Geology**. 2 ed. London: Chapman & Hall. 1993.

- Fernandes, N. F.; Amaral, C. P. Movimentos de massa: uma abordagem geológico-geomorfológica. In: Guerra, A. J. T.; Cunha, S. ed. **Geomorfologia e meio ambiente**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1996. cap 3, p. 123-194.
- Ferreira, J. B. **Dicionário de geociências**. 2 ed. Belo Horizonte: Armazém de Idéias, 1995. 533 p.
- Florenzano, T. G. **Unidades geomorfológicas da região sudeste (SP) identificadas por imagens de satélites**. São Paulo, 164p. Tese (Doutorado em Geografia), Universidade de São Paulo, Faculdade de Filosofia Ciências Humanas e Letras, Depto Geografia, 1993.
- Florenzano, T. G.; Csordas, S. M. **Mapa geomorfológico da região do vale do Paraíba e litoral norte do Estado de São Paulo**. São José dos Campos: INPE, 1993. 14p. (INPE-5531-PRP/179).
- Gao, J. ;Lo, C. P. Micro-scale modelling of terrain susceptibility to landsliding from a DEM: a GIS approach. **Geocarto International**, v. 10, n. 4, p. 15-30, Dec. 1995.
- Gardner, T. W., Sasowsky, K. C., Day, R. L. Automatic extraction of geomorphometric properties from digital elevation data. **Zeitschrift für Geomorphologie**, vol 2, Supplementband 80, p. 57-68, December, 1990. 2 International Conference on Geomorphology: Geomorphology and Geoecology, Frankfurt, Mai 1989.
- Gerardi, L. H. O.; Silva, B.C. N. **Quantificação em Geografia** São Paulo: Difel, 1981. 161 p.
- González, C. Ortigosa, L. Martí, C. Garcia-Ruiz, J. The study of the spatial organization of geomorphic processes in mountain areas using GIS. **Mountain Research and Development**, v. 15, n. 3, p. 241-249, 1995.

- Guerra, A. J. T. Processos erosivos nas encostas. In: Guerra, A. J. T.; Cunha, S. ed. **Geomorfologia: uma atualização de conceitos e bases**, Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1994, Cap 1, p. 23-50.
- Guerra, A. T.; Guerra, A. J. T. **Novo dicionário geológico-geomorfológico**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1997. 648 p.
- Guidicini, G.; Nieble, C. M. **Estabilidade de taludes naturais de escavação**. 2 ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1993. 196 p.
- Guimarães, R. F., Gomes, R. A. T. , Fernandes, N. F. Avaliação de parâmetros morfológicos das cicatrizes dos escorregamentos da bacia do Rio Quitite (RJ). In: Simpósio Nacional Geomorfologia, Florianópolis, 1998. **Anais**. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, Depto de Geociências, , 1998. v. 14, p. 316-320.
- Hansen, M. J. Strategies for classification of landslides. In: Brunsten, D.; Prior, D. B. ed. **Slope instability**. Salisbury: John Wiley & Sons, 1984, Cap. 1, p. 1-25.
- Hugli, H; Frei, W. Understanding anisotropic reflection in mountainous terrain. **Photogrametric Engineering and Remote Sensing**, v. 49, n. 5, p. 671-683, 1983.
- Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). **Manual técnico de Geomorfologia**. Rio de Janeiro: 1995. 112 p.
- _____. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). **Mapa de vegetação do Brasil**. Rio de Janeiro, 1988. (escala 1:5 000 000).
- Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) **Tutorial de geoprocessamento**. [online]. <http://sputnik.dpi.inpe.br/spring/teoria>. 1998.

Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) **Estudo das instabilizações de encostas da Serra do Mar na região de Cubatão objetivando a caracterização do fenômeno “corrida de lama” e prevenção de seus efeitos.** São Paulo: 1989. 185 p. (IPT-relatório n. 26258).

_____ **Relatórios técnicos de orientação a áreas de risco.**, São Paulo, 1991 a 1996.

Landslide News. n. 2, 23 p., 1988 Japan Landslide Society.

King, C.; Delpont, G. Spatial assessment of erosion: contribution of remote sensing, a review. **Remote Sensing Review**, v. 7, p. 223-232, 1993.

Kurkdjian, R. L. D. et al. **Macrozoneamento da região do Vale do Paraíba e litoral norte do Estado de São Paulo.** São José dos Campos, INPE, 1992. 176p. (INPE-5381-PRP/165).

Leprieur, C. E.; Durand, J. M.; Peyron, J. L. Influence of topography on forest reflection using Landsat Thematic Mapper and Digital Terrain Data. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 54, n. 4, p. 491-496, 1988.

Lillesand, T. M.; Kiefer, R. W. **Remote sensing and image interpretation.** 3 ed. New York: John Wiley & Sons, 1994. 750 p.

Linsley Jr, Kohler, M. A., Paulhus, J. L. H. **Applied Hydrology.** Tokio: McGraw-Hill, 1949. 689 p.

Macedo, E. S.; Akiossi, A. Escorregamentos ocorridos no Brasil entre 1988 e 1996: levantamento a partir de notícias de jornal. In: 39 Congresso Brasileiro de Geologia: Geologia e Sociedade, Salvador, 1996. **Anais.** São Paulo: Sociedade Brasileira de Geologia, 1996. v. 4, p. 149-152.

- Macedo, E. S.; Ogura, A T.; Santoro, J. Landslide warning system in Serra do Mar slopes, São Paulo, Brazil. In: International Congress International Association for Engineering Geology and the Environment, 8., Vancouver, 1998. **Proceedings**. Rotterdam: International Association for Engineering Geology and the Environment, 1998. p. 1967-1971
- Marques, J. S. Ciência geomorfológica. In: Guerra, A. J. T.; Cunha, S. ed, **Geomorfologia: uma atualização de conceitos e bases**, Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1994, Cap. 1, p. 23-50.
- Mather, P. M. **Computer processing of remotely sensed images: an introduction**. New York: John Wiley & sons. 1987. 352 p.
- McDermid, G. J.; Franklin, S. Spectral, spatial and geomorphometric variables for the remote sensing of slope processes. **Remote Sensing of Environment**, n. 49, p. 57-71, 1994.
- 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.
- Meijerink, A. M. J. Data acquisition and capture through terrain mapping units. **ITC Journal**, 1, p 21-44, 1988.
- Milton, E. J. Principles of field spectroscopy. **International Journal of Remote Sensing**, v. 8, n.12, p. 1807-1827, 1987.
- Netgis Geoprocessamento e Informática **SPRING 2.0: Sistema de Processamento de Informações Georreferenciadas**. São José dos Campos, 1997a. v 2: Processamento de imagens.

- _____ **SPRING 2.0: Sistema de Processamento de Informações Georreferenciadas.**
São José dos Campos: 1997b. v 3: Modelagem, análise e consulta espacial.
- _____ **SPRING 2.0: Sistema de Processamento de Informações Georreferenciadas.**
São José dos Campos: 1997c. v 1: Definição e edição de mapas.
- Netto, A L. C. Hidrologia de encosta na interface com a Geomorfologia In: Guerra, A. J. T.; Cunha, S. ed. **Geomorfologia: uma atualização de conceitos e bases**, Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1994, Cap 3, p. 93-148.
- Nimer, E. **Climatologia do Brasil**. Rio de Janeiro: IBGE, 1979. p. 211-305. Cap: Climatologia da região sudeste.
- Nogami, M. **Geomorphometric measures for DEM** [on line] <<http://www.eng.metro-uac.jp/~nogami/measures.html>>. July. 1998.
- Novo, E. M. L. M. **Sensoriamento remoto: princípios e aplicações**. São Paulo: Edgard Blücher, 1992. 308p.
- Nunes, L. H.; Modesto, R. P. Comportamento pluviométrico nos municípios atendidos pelo plano preventivo de defesa civil-PPDC. **Revista do Instituto Geológico**, v. 13, n. 1, p. 47-57, jan/jun, 1992.
- _____ Pluviometria e problemas ambientais no município de Guarujá. **Revista do Departamento de Geografia**. v. 10, p. 59-72, abr. 1996.
- O'Callaghan, J. F.; Mark, D. M. The extraction of drainage networks from digital elevation data. **Computer Vision, Graphics and Image Interpretation**. v. 28, n. 3, p.323-344, Dec. 1984.
- 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. 125p. (INPE-6343-TDI/595). Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 1996.
- Patton, P. C. Drainage basin morphometry and floods. In: Baker, V. R., Kochel, R. C. e Patton, P. C. ed. **Flood geomorphometry**. New York: Wiley, 1988, Cap. 3, p. 51-65
- Pike, R. J. The geometric signature: quantifying landslide - terrain types from digital elevation models. **Mathematical Geology**, v 20, n. 5, 1988, p. 491-511.
- Projeto RADAMBRASIL. **Folhas SC-32 Rio de Janeiro/Vitória**: geologia, geomorfologia, pedologia, vegetação, uso potencial do solo, levantamento de recursos naturais. Rio de Janeiro: Ministério das Minas e Energia, 1983, 775p.
- Richards, J. A. **Remote sensing digital image analysis**: an introduction. 2 ed. Berlin: Springer-Verlag, 1995. 340 p.
- Romanovskii, N. V., Gravis, G. F., Leibeman, M. O., Melnikov, E. Periglacial processes as geoindicators in the cryolithzone. In: Berger, A. R. Iams, W. J. ed. **Geoindicators**: assessing rapid environmental changes in earth systems. Rotterdam: Balkema, 1996. p. 47-68
- Rydén, A. Approaches to practical remote sensing for environmental studies: experiences from a case study in Swaziland and southern Mozambique. **ITC Journal**, n. 2, p. 136-145, 1997
- Schowengerdt, R. A. **Techniques for image processing and classification in remote sensing**. Orlando: Academic, 1983. 249p
- Selby, M. J. **Hillslope materials and processes**. Oxford: Oxford University, 1982. 264 p.

- Setzer, J. **Atlas climático ecológico do Estado de São Paulo**. São Paulo: Comissão Interestadual da Bacia Paraná-Uruguaí, 1966. 61p.
- Short, N. M. Remote sensing principles applied to space imagery. In: Short, N. M.; Blair, R. W. ed. **Geomorphology from space: a global overview of regional landforms**, Washington, DC: NASA, 1986. p. 679-688. (NASA, SP-486).
- Secretaria do Meio Ambiente, Governo do Estado de SP - SMA. **Instabilidade da Serra do Mar no Estado de São Paulo**. São Paulo, 1990a, v. 3: Conceitos básicos.
- _____ **Instabilidade da Serra do Mar no Estado de São Paulo**. São Paulo, 1990b, v. 2: Desenhos.
- _____ **Relatórios técnicos de orientação a áreas de risco**, São Paulo, 1991 a 1996.
- Soares, P. C.; Fiori, A. P. Lógica e sistemática na análise e interpretação de fotografias aéreas em Geologia. **Notícia Geomorfológica**. v. 16, n 32, p. 71-103, dezembro, 1976.
- Steffen, C. A. Fundamentos de radiometria in: Steffen, C. A., Moraes, E. C., Gama, F. F. Radiometria espectral. (Tutorial). In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 8., Salvador, 1996. **Anais**. São José dos Campos: INPE, cap 1, p. 1.1-1.17.
- Sternberg, H. Enchentes e movimentos coletivos do solo no Vale do Paraíba em dezembro de 1948 - influência da exploração destrutiva das terras. **Revista Brasileira de Geografia**, ano 11, n. 2, p. 223 - 261, abr - jun. 1949.
- Strahler, A. N. Equilibrium theory of erosional slopes approached by frequency distribution analysis In: Schumm, S. A. ed. **River morphology**. Strondsburgh: Dowden Hutchinson & Ross, 1972, p. 230-233.

- Tarboton, D. G., Bras, R. L., Rodriguez-Iturbe, I. On the extraction of channel networks from digital elevation data. **Hydrological Processes**, v. 5, n. 1, p 81-100. 1991.
- Thomas, M. F. **Tropical geomorphology: a study of weathering and landform development in warm climates**. 2 ed. London: MacMillan, 1979. 332 p.
- Tricart, J. **The landforms of the humid tropics, forests and savannas**. London: Longman, 1972. 306 p.
- Tuttle, S. D. **Landforms and landscapes**. Iowa: Ed Brown, 1970. 136 p.
- Twidale, C. R. **Structural landforms - landforms associated with granitic rocks, faults and folded strata**. Cambridge: The MIT Press, 1971. 247 p.
- _____. **Granite landforms**. Amsterdam: Elsevier, 1982. 372 p.
- Valério Filho, M.; Pinto, S. A. F. **Resultados preliminares da utilização de imagens TM Landsat na identificação de áreas submetidas a processos de erosão**. São José dos Campos: INPE, 1986. 26 p. (INPE 4111-PRE/1036) .
- Varnes, D. J. **Slope movements: types and processes - landslides analysis and control**. Washington: Nacional Academy of Sciences, 1978. p. 11-13.
- _____. **Landslide hazard zonation: a review of principles and practice**. Paris: UNESCO, 1985. 63 p.
- Veneziani, P.; Anjos, C. E. **Metodologia de interpretação de dados de sensoriamento remoto e aplicações em Geologia**. São José dos Campos: INPE, 1982. 54 p. (INPE-2227-MD1014).
- Verstappen, H. Th. **Remote sensing in Geomorphology**. Amsterdam: Elsevier, 1977. 214p.

- Walsh, S. J.; Butler, D. R. Morphometric and multispectral image analysis of debris flow for natural hazard assessment. **Geocarto International**, v. 12, n. 1 ,p. 59-70, Mar. 1997.
- Walsh, S. J.; Butler, R.; Malanson, G. P. An overview of scale, pattern, processes relationships in Geomorphology: a remote sensing and GIS perspective. **Geomorphology**, v. 21, n. 3-4, p. 183-205, 1998. Issue edition: Application of remote sensing and GIS in Geomorphology (Butler, D. and Walsh, S. J. ed).
- Weibel, R.; Heller, M. Digital terrain modelling. In: Maguire, D., Goodchild, M. F., Rhind, D. W. ed. **Geographical Information Systems: principles and applications**. New York: Longman, 1994. v. 1, Cap 19, p.269-297.
- Whalley, W. B. **Properties of materials and geomorphological explanation**. London: Ed. Oxford, 1976. 60 p.
- Wolle, C. M. **Análise de escorregamentos translacionais numa região da Serra do Mar no contexto de uma classificação de mecanismos de instabilização de encostas**. São Paulo, 800 p. Tese (Doutorado em Engenharia - Universidade de São Paulo, Escola Politécnica, 1988.
- Zaruba, Q.; Mencl, V. **Landslides and their control: development in geotechnical engineering**. Amsterdam: Elsevier, 1982. 324 p.
- Zuquette, L. V. Pejón, O. J., Gandolfi, N., Paraguassu, A. B. Considerações básicas sobre a elaboração de cartas de zoneamentos de probabilidade ou possibilidade de ocorrer eventos perigosos e de riscos associados. **Geociências** (UNESP-Universidade Estadual Paulista), v. 14, n.2, p. 9-39, jul./dez. 1995.

APÊNDICE A

BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

ERDAS. **Erdas imagine 8.3**: tour guides. Atlanta: 1997.

_____ **Erdas Imagine 8.3**: field guides. Atlanta: 1997.

Gardiner, V. Dackombi, R. **Geomorphological field manual**. London: George Allen & Unwin, 1983. 254p.

APÊNDICE B PROGRAMAS ELABORADOS EM LEGAL

1) Densidade de drenagem por unidades de relevo

```
{
□
Tematico drena ("Drenag");
□
Tematico rel ("unidadesrel");
Digital dendre ("isolinha");

drena = Recuperar(Nome="hidro");
rel = Recuperar(Nome="relevo");
dendre = Novo(Nome="dens_dre", ResX=30, ResY=30, Escala=50000, Min=0, Max=1000000);
dendre = ConteZ(drena, drena.Classe=="rio" && rel.Classe=="A",
                 drena.Classe=="rio" && rel.Classe=="B",
                 drena.Classe=="rio" && rel.Classe=="C",
                 drena.Classe=="rio" && rel.Classe=="D",
                 drena.Classe=="rio" && rel.Classe=="E",
                 drena.Classe=="rio" && rel.Classe=="F",
                 drena.Classe=="rio" && rel.Classe=="G",
                 drena.Classe=="rio" && rel.Classe=="H",
                 drena.Classe=="rio" && rel.Classe=="I",
                 drena.Classe=="rio" && rel.Classe=="J",
                 drena.Classe=="rio" && rel.Classe=="L",
                 drena.Classe=="rio" && rel.Classe=="M",
                 drena.Classe=="rio" && rel.Classe=="N",
                 drena.Classe=="rio" && rel.Classe=="O",
                 drena.Classe=="rio" && rel.Classe=="P",
                 drena.Classe=="rio" && rel.Classe=="Q",
                 drena.Classe=="rio" && rel.Classe=="S",
                 drena.Classe=="rio" && rel.Classe=="T",
                 drena.Classe=="rio" && rel.Classe=="U",
                 drena.Classe=="rio" && rel.Classe=="V");
}
```


2) Amplitude altimétrica local por unidades de relevo

```
{
□
Tematico rel ("unidadesrel");
□
Numerico grad ("isolinha");
□
Digital ampalt ("isolinha");
□

□
rel = Recuperar(Nome="relevo");
□
grad = Recuperar(Nome="G_Ret");
□
ampalt = Novo(Nome="amp_alt", ResX=30, ResY=30, Escala=50000, Min=0, Max=1000000);
□
ampalt = FaixaZ(grad, rel.Classe=="A",
                rel.Classe=="B",
                rel.Classe=="C",
                rel.Classe=="D",
                rel.Classe=="E",
                rel.Classe=="F",
                rel.Classe=="G",
                rel.Classe=="H",
                rel.Classe=="I",
                rel.Classe=="J",
                rel.Classe=="L",
                rel.Classe=="M",
                rel.Classe=="N",
                rel.Classe=="O",
                rel.Classe=="P",
                rel.Classe=="Q",
                rel.Classe=="R",
                rel.Classe=="S",
                rel.Classe=="T",
                rel.Classe=="U",
                rel.Classe=="V");
}
```


3) Declividade dominante por unidades de relevo

```
{
□
Tematico rele ("unidadesrel");
□
Numerico dec ("declive");
□
Digital maidec ("isolinha");
□

□
rele = Recuperar(Nome="relevo");
□
dec = Recuperar(Nome="dec_tinret");
□
maidec = Novo(Nome="dec_max", ResX=30, ResY=30, Escala=50000, Min=0, Max=1000000);
maidec = MaiZ(dec, rele.Classe=="A",
               rele.Classe=="B",
               rele.Classe=="C",
               rele.Classe=="D",
               rele.Classe=="E",
               rele.Classe=="F",
               rele.Classe=="G",
               rele.Classe=="H",
               rele.Classe=="I",
               rele.Classe=="J",
               rele.Classe=="L",
               rele.Classe=="M",
               rele.Classe=="N",
               rele.Classe=="O",
               rele.Classe=="P",
               rele.Classe=="Q",
               rele.Classe=="R",
               rele.Classe=="S",
               rele.Classe=="T",
               rele.Classe=="U",
               rele.Classe=="V");

□
}
```


4) Contagem de cicatrizes por intervalo de classes de hipsometria

```
{
□
Tematico hip ("hipso");
□
Tematico cic ("cicatriz");
□
Digital altcic ("isolinha");
□

□
hip = Recuperar(Nome="hipsometria");
□
cic = Recuperar(Nome="cicat");
□
altcic = Novo(Nome= "alt_cic", ResX=30, ResY=30, Escala=50000, Min=0, Max=1000000);
altcic = ConteZ(cic, cic.Classe=="cicatriz" && hip.Classe=="0-20",
                cic.Classe=="cicatriz" && hip.Classe=="20-100",
                cic.Classe=="cicatriz" && hip.Classe=="100-300",
                cic.Classe=="cicatriz" && hip.Classe=="300-500",
                cic.Classe=="cicatriz" && hip.Classe=="500-700",
                cic.Classe=="cicatriz" && hip.Classe=="700-900",
                cic.Classe=="cicatriz" && hip.Classe=="900-1060");
}
}
```

5) Contagem de cicatrizes por intervalo de classes de aspecto (orientação de vertente)

```
{
□
Tematico aspec ("expo");
□
Tematico cic ("cicatriz");
□
Digital aspeccic ("isolinha");
□

□
aspec = Recuperar(Nome="asp_fat");
cic = Recuperar(Nome="cicat");
aspeccic=Novo(Nome="aspec_cic", ResX=30, ResY=30, Escala=50000, Min=0, Max=1000000);
aspeccic= ConteZ(cic, cic.Classe=="cicatriz" && aspec.Classe=="0-45",
                 cic.Classe=="cicatriz" && aspec.Classe=="45-90",
                 cic.Classe=="cicatriz" && aspec.Classe=="90-135",
                 cic.Classe=="cicatriz" && aspec.Classe=="135-180",
                 cic.Classe=="cicatriz" && aspec.Classe=="180-225",
                 cic.Classe=="cicatriz" && aspec.Classe=="225-270",
                 cic.Classe=="cicatriz" && aspec.Classe=="270-315",
                 cic.Classe=="cicatriz" && aspec.Classe=="315-360");
}
}
```


6) Contagem de cicatrizes por intervalo de classe de declividade

```
{
□
Tematico dec ("declive_tema");
□
Tematico cic ("cicatriz");
□
Digital deccic ("isolinha");
□

□
dec = Recuperar(Nome="dec_fat");
□
cic = Recuperar(Nome="cicat");
□
deccic = Novo(Nome="dec_cic", ResX=30, ResY=30, Escala=50000, Min=0, Max=1000000);
deccic = ConteZ(cic, cic.Classe=="cicatriz" && dec.Classe=="0-3",
                cic.Classe=="cicatriz" && dec.Classe=="3-6",
                cic.Classe=="cicatriz" && dec.Classe=="6-12",
                cic.Classe=="cicatriz" && dec.Classe=="12-17",
                cic.Classe=="cicatriz" && dec.Classe=="17-22",
                cic.Classe=="cicatriz" && dec.Classe=="22-27",
                cic.Classe=="cicatriz" && dec.Classe=="27-32",
                cic.Classe=="cicatriz" && dec.Classe=="32-37",
                cic.Classe=="cicatriz" && dec.Classe=="37-45",
                cic.Classe=="cicatriz" && dec.Classe=="45-60",
                cic.Classe=="cicatriz" && dec.Classe=="60-75",
                cic.Classe=="cicatriz" && dec.Classe=="75-80" );
}
}
```

7) Contagem de cicatrizes por formas de vertentes

```
{
□
Tematico config ("morfologia");
□
Tematico cic ("cicatriz");
□
Digital confcic ("isolinha");
□

□
config = Recuperar(Nome="configuracao");
□
cic = Recuperar(Nome="cicat");
confcic = Novo(Nome="cic_conf", ResX=30, ResY=30, Escala=50000, Min=0, Max=1000000);
confcic = ConteZ(cic, cic.Classe=="cicatriz" && config.Classe=="concavas",
                 cic.Classe=="cicatriz" && config.Classe=="convexas",
                 cic.Classe=="cicatriz" && config.Classe=="retilineas");
}
}
```


8) Contagem de cicatrizes por unidades de relevo

```
{
□
Tematico rele ("unidadesrel");
□
Tematico cica ("cicatriz");
□
Digital cicarel ("isolinha");
□

□
rele = Recupere(Nome="relevo");
□
cica = Recupere(Nome="cicat");
cicarel = Novo(Nome="cic_unid", ResX=30, ResY=30, Escala=50000, Min=0, Max=1000000);
cicarel = ConteZ(cica, cica=="cicatriz" && rele.Classe=="A",
                cica=="cicatriz" && rele.Classe=="B",
                cica=="cicatriz" && rele.Classe=="C",
                cica=="cicatriz" && rele.Classe=="D",
                cica=="cicatriz" && rele.Classe=="E",
                cica=="cicatriz" && rele.Classe=="F",
                cica=="cicatriz" && rele.Classe=="G",
                cica=="cicatriz" && rele.Classe=="H",
                cica=="cicatriz" && rele.Classe=="I",
                cica=="cicatriz" && rele.Classe=="J",
                cica=="cicatriz" && rele.Classe=="L",
                cica=="cicatriz" && rele.Classe=="M",
                cica=="cicatriz" && rele.Classe=="N",
                cica=="cicatriz" && rele.Classe=="O",
                cica=="cicatriz" && rele.Classe=="P",
                cica=="cicatriz" && rele.Classe=="Q",
                cica=="cicatriz" && rele.Classe=="R",
                cica=="cicatriz" && rele.Classe=="S",
                cica=="cicatriz" && rele.Classe=="T",
                cica=="cicatriz" && rele.Classe=="U",
                cica=="cicatriz" && rele.Classe=="V");
}
```


9) Classificação de risco

```
{
Tematico ocupacao ("ocupacao");
Tematico dec ("decliveT_2");
Tematico alt ("hipso");
Tematico conf ("morfologia");
Tematico aspec ("expo");
Tematico morfo ("morfodinamica");
Tematico risco ("mapafinal");

conf = Recuperar(Nome="configuracao");
aspec = Recuperar(Nome="asp_fat2");
ocupacao = Recuperar(Nome="ocupa");
alt = Recuperar(Nome="hipsometria");
dec = Recuperar(Nome="dec_fat2");
morfo = Recuperar(Nome="dinamica");
risco = Novo(Nome="area_risco", ResX=30, ResY=30, Escala=50000);
risco = Atribua (CategoriaFim = "mapafinal")
{
    "Muito alto" : ((dec.Classe=="17-22" || dec.Classe=="22-27"
|| dec.Classe=="27-32" || dec.Classe=="37-45") && ( alt.Classe=="100-300" ||
alt.Classe=="300-500") && (aspec.Classe=="135-180" || aspec.Classe=="90-135" ||
aspec.Classe=="180-225") && (ocupacao.Classe=="ocupacao" ||
morfo.Classe=="morfo") && (conf.Classe=="concavas" || conf.Classe==
"convexas")),
    "Alto" : ((dec.Classe=="17-22" || dec.Classe=="22-27" ||
dec.Classe=="27-32" || dec.Classe=="37-45") && ( alt.Classe=="100-300" ||
alt.Classe=="300-500") && (aspec.Classe=="135-180" || aspec.Classe=="90-135" ||
aspec.Classe=="180-225") && (ocupacao.Classe=="ocupacao" ||
morfo.Classe=="morfo")),
    "Moderado-alto" : ((dec.Classe=="17-22" || dec.Classe=="22-
27" || dec.Classe=="27-32" || dec.Classe=="37-45") && ( alt.Classe=="100-300"
|| alt.Classe=="300-500") && (aspec.Classe=="135-180" || aspec.Classe=="90-135"
|| aspec.Classe=="180-225")),
    "Moderado" : ((dec.Classe=="12-17" || dec.Classe=="32-37" ||
dec.Classe=="37-45") && (alt.Classe=="100-300") && (aspec.Classe=="0-45" ||
aspec.Classe=="45-90" || aspec.Classe=="270-315" || aspec.Classe=="315-360") &&
(conf.Classe=="concavas" || conf.Classe=="convexas") &&
(ocupacao.Classe=="ocupacao" || morfo.Classe=="morfo")),
    "Moderado-baixo" : ((dec.Classe=="6-12" || dec.Classe=="12-
17") && (alt.Classe=="20-100") && (aspec.Classe=="270-315" || aspec.Classe=="225-
270") && (ocupacao.Classe=="ocupacao" || morfo.Classe=="morfo")),
    "Baixo" : ((dec.Classe=="0-3" || dec.Classe=="3-6" ||
dec.Classe=="60-75" || dec.Classe=="75-80" || dec.Classe=="45-60") &&
(alt.Classe=="20-100" || alt.Classe=="700-900" || alt.Classe=="900-1060") &&
(aspec.Classe=="225-270"));
}
}
```


APÊNDICE C

CARTAS MORFOMÉTRICAS GERADAS A PARTIR DE MNT

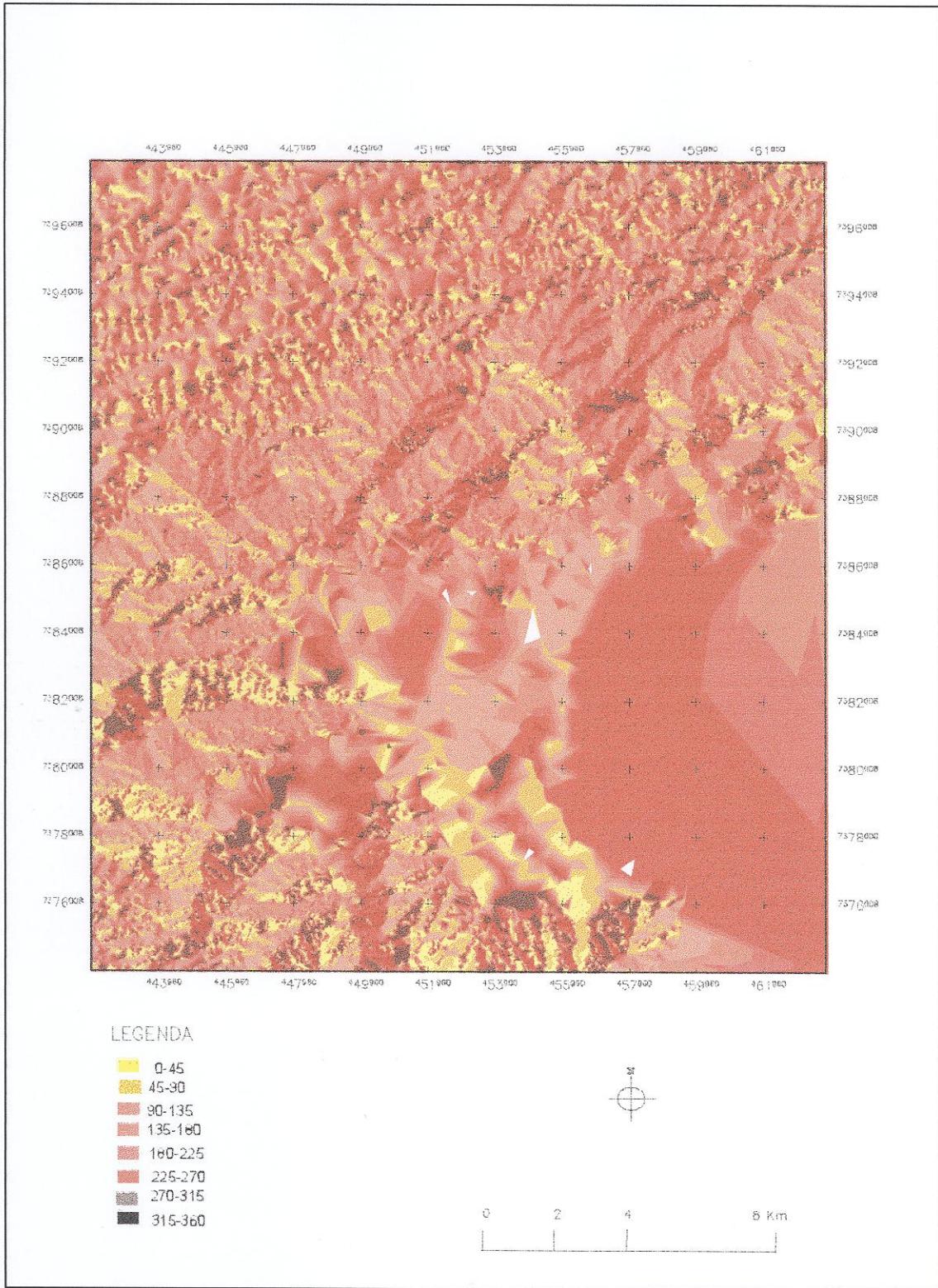


Fig C 1 - Carta de aspecto

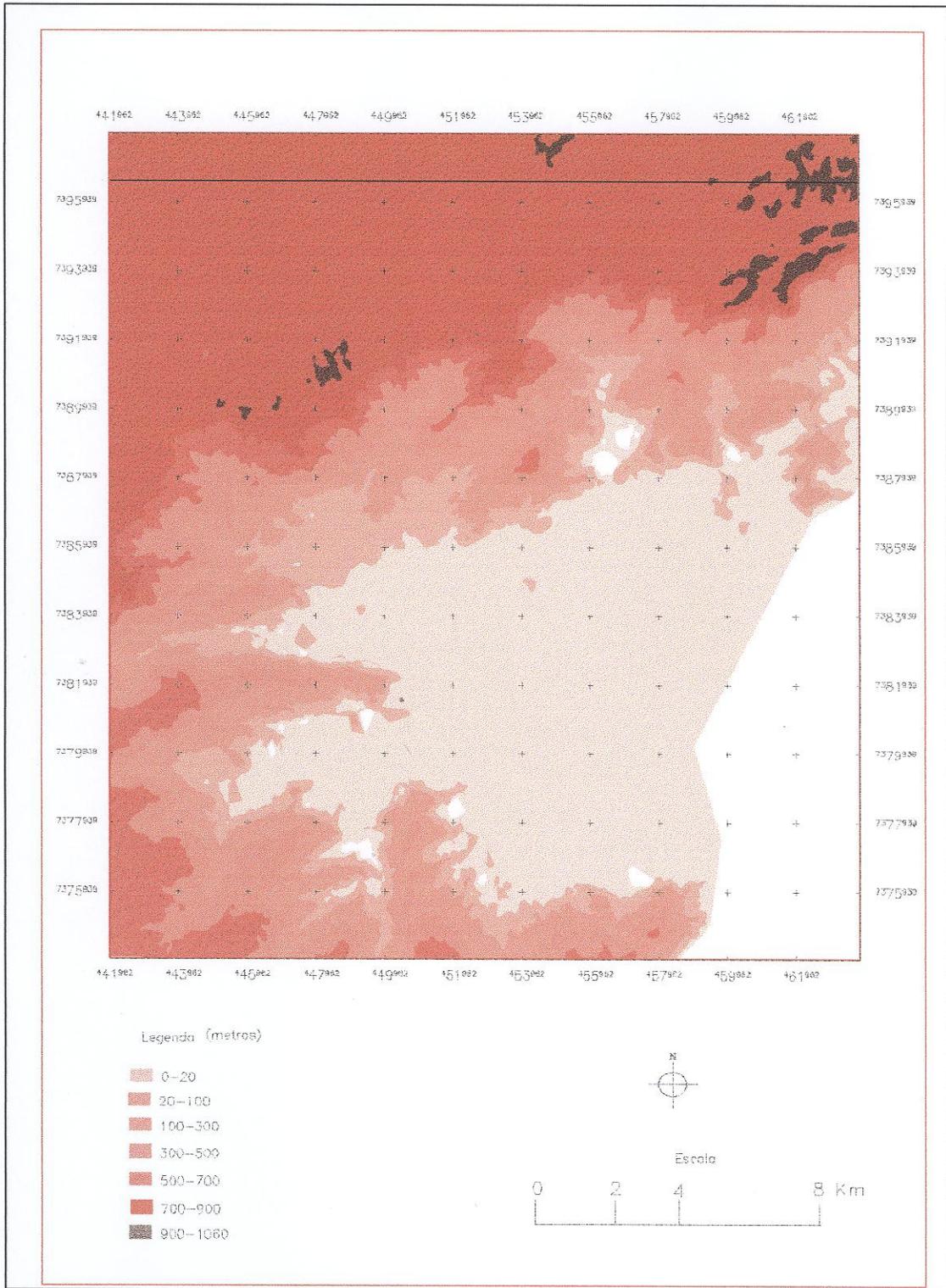


Fig . C 2 - Carta hipsométrica

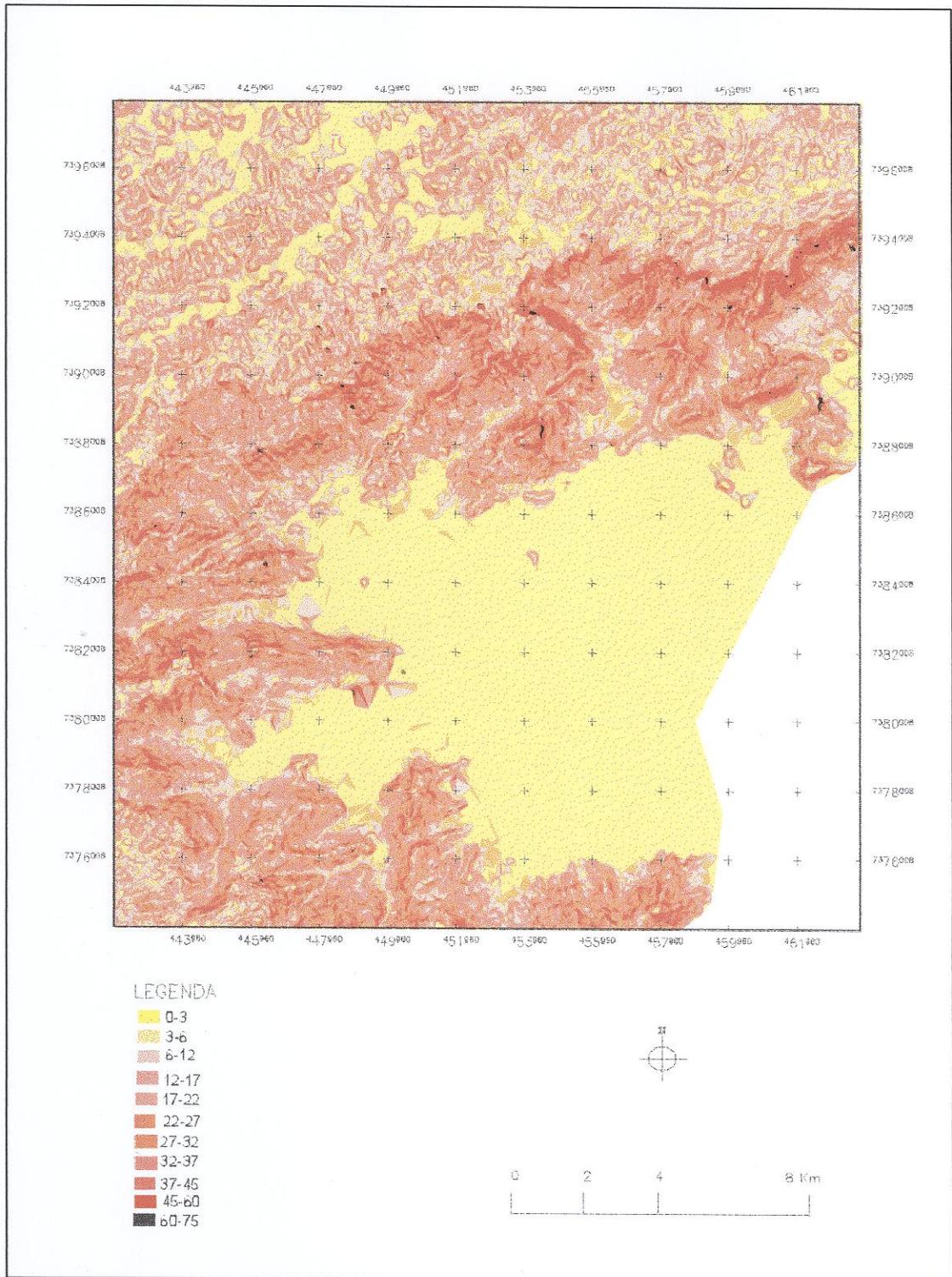


Fig C 3. - Carta de declividade

