



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

INPE-6966-TDI/654

**TÉCNICAS DE SENSORIAMENTO REMOTO E SIG APLICADAS
AO PLANEJAMENTO DE UMA RODOVIA: ESTUDO DE CASO –
TRECHO OESTE DO RODOANEL METROPOLITANO DE
SÃO PAULO**

Luciano Rodrigues Penido

Dissertação de Mestrado em Sensoriamento Remoto, orientada pelo Dr. Hermann
Johann Heinrich Kux e pelo Dr. Juércio Tavares de Mattos, aprovada em
setembro de 1998.

INPE
São José dos Campos
1998

528.711.7 : 711.7

PENIDO, L.R.

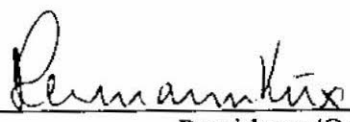
Técnicas de Sensoriamento Remoto e SIG aplicadas ao planejamento de uma rodovia: Estudo de caso - trecho oeste do rodoanel metropolitano de São Paulo / L.R.Penido. – São José dos Campos: INPE, 1998.

123p. – (INPE-6966-TDI/654).

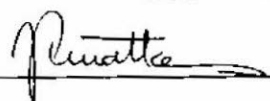
1.Sensoriamento Remoto. 2.Sistemas de informações geográficas(SIG). 3.Planejamento urbano. 4.Rodovia. 5.Processamento digital de imagens. 6.Mapeador Temático (Landsat). 7.Investigação. I.Título.

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

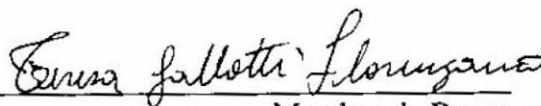
Dr. Hermann Johann Heinrich Kux


Presidente/Orientador

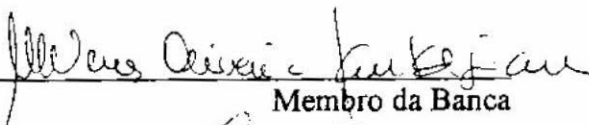
Dr. Juércio Tavares de Mattos


Orientador

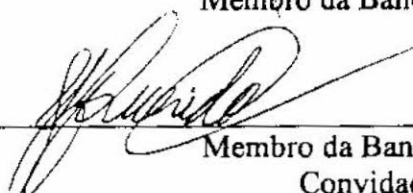
Dra. Teresa Gallotti Florenzano


Membro da Banca

Dra. Maria de Lourdes Neves Kurkdjian


Membro da Banca

Dr. José Geraldo Querido


Membro da Banca
Convidado

Candidato (a): Luciano Rodrigues Penido

AGRADECIMENTOS

Ao INPE, pela oportunidade de aperfeiçoamento profissional e pessoal.

Ao CNPq, pelo apoio financeiro, fundamental para a realização deste trabalho.

À DERSA, na pessoa do Sr. Cleanto de Freitas Barreto (Gerente de planejamento e engenharia de transporte), que disponibilizou todo o material e apoio técnico que foram necessários a este trabalho. À sua equipe, especialmente ao engº Paulo Roberto Marufuji, pelo acompanhamento prestado com total diligência; ao engº Manoel Augusto Cordeiro Rodrigues, ao engº Danilo Holanda Rolim, à engª Luíza Yabiko e ao engº Aristóteles S. Viana.

À EMPLASA, na pessoa da Adélia Souza dos Santos e também à Sônia Cristina Dias Baptista e à Anelise Dassoli, pelo empréstimo de material cartográfico e orientação técnica..

À empresa Imagem Sensoriamento Remoto, na pessoa do MSc. Manoel Ortiz, pelo fornecimento do Modelo Numérico de Terreno.

À empresa Intersat, na pessoa do seu Diretor Luiz Leonardi, pelo fornecimento de uma imagem HRV-SPOT, que não pôde ser utilizada por apresentar dois anos de defasagem em relação aos demais dados de sensoriamento remoto.

Ao IPT, na pessoa do Diretor Omar Yazbek Bitar, pelo fornecimento dos dados de geomorfologia.

Ao Dr. Hermann H. Kux., pela orientação e pelas exaustivas revisões do texto. Pela liberdade que me permitiu na definição do projeto de pesquisa, no uso de sua sala e estação de trabalho. Pelo apoio, confiança e companhia.

Ao Dr. Juércio T. de Mattos, pela atenção dispensada, pela revisão do texto e pela sugestão de contactar a DERSA.

Aos coordenadores de curso Drs. João Roberto dos Santos, José Carlos Epiphanyo e Flávio Jorge Ponzoni, pelos valiosos auxílios e pela paciente atenção dispensada.

À Sra. Etelvina, pela atenção maternal dispensada no atendimento aos alunos da pós-graduação.

Aos professores das disciplinas do curso de sensoriamento remoto.

Ao Dr. João Roberto dos Santos, à MSc. Silvia Pardi Lacruz, ao MSc. Camilo Daleles Rennó, à MSc. Madalena Niero Pereira, ao engº Cláudio José de Sousa, ao MSc. Alexandre Cândido Xavier, ao MSc. Haron Abrahim M. Xaud, ao Marciel Silva Santos e ao Francisco Dario Maldonado, pelos valiosos auxílios prestados em todos os trabalhos realizados no decorrer deste curso.

Aos funcionários da divisão DPI/INPE: Dr. Miguel Vieira Monteiro, MSc. João Pedro Cerveira Cordeiro, MSc. Cláudio Barbosa, MSc. Júlio d'Alge, MSc. Guaraci Erthal, MSc. Leonardo Bins, MSc. Silvana Amaral, MSc. Eimar Lopes e José Carlos Moreira, pela assistência técnica referente ao SPRING e à linguagem LEGAL.

À MSc. Cláudia Linhares, à MSc. Madalena Niero Pereira, à MSc. Silvia Pardi Lacruz, ao MSc. Manoel Araújo de Souza Júnior, ao engº José Sebastião Penido e ao Engº Cláudio José de Sousa, pelas revisões do texto.

Ao MSc. Waterloo Pereira Filho, pela impressão dos mapas temáticos.

Ao Júlio Ricardo Lisboa Aragão, pela assistência técnica da rede de computadores do LTID.

Ao Cláudio Corrêa, pela assistência técnica dos computadores e impressoras do SPD.

A todos os amigos e aqueles que, de forma direta ou indireta, colaboraram com a realização deste trabalho.

RESUMO

Este estudo apresenta uma metodologia de aplicação de técnicas de sensoriamento remoto e Sistemas de Informações Geográficas, num processo de investigação conforme realizado na fase de reconhecimento do projeto de construção de uma rodovia. A área de estudo está localizada na Região Metropolitana de São Paulo, onde será implantado o Trecho Oeste do Rodoanel Metropolitano de São Paulo. Esta área foi qualificada segundo sua aptidão para a implantação de uma rodovia, onde foram avaliadas duas alternativas para o traçado desta seção do Rodoanel. Foram utilizados dados temáticos de geologia, geomorfologia, declividades, áreas sob proteção ambiental e zonas industriais. As informações de uso e cobertura da terra obtidas por classificação supervisionada de uma imagem TM-Landsat, bandas 1, 4 e 7. Os temas de interesse foram integrados por operações matemáticas e associações lógicas, produzindo um mapa-síntese de aptidão física, incluindo cinco classes (muito alta, alta, moderada, baixa e muito baixa), onde foram discriminadas as áreas sem restrições ao uso e as áreas destinadas à preservação ambiental ou zonas industriais. Neste mapa foi obtida a extensão das alternativas de traçado que interceptam cada classe. Este estudo foi realizado em cooperação com o Desenvolvimento Rodoviário S.A. (DERSA), que forneceu apoio técnico e operacional.

REMOTE SENSING AND GIS APPLIED TO HIGHWAY PLANNING, CASE STUDY: WESTERN SECTION OF SÃO PAULO METROPOLITAN RODOANEL

ABSTRACT

This study presents a methodology on the use of both remote sensing and Geographical Information Systems techniques, in an investigation process performed during the survey phase of a road construction project. The test site is located within the São Paulo Metropolitan Region, and corresponds to the western section of the "São Paulo Metropolitan Rodoanel". This area was qualified according to its aptness to locate this highway, where two alternatives for the trace of this section of the Rodoanel were evaluated. Thematic data on geology, geomorphology, slopes, areas under environmental protection and industrial zones, as well as land use and land cover data were used. These informations allowed a supervised classification of a TM-Landsat image, channels 1, 4 and 7. The themes of interest were integrated by mathematical operations and logic associations, producing a map of physical aptness, including five classes of aptness (very high, high, moderate, low and very low), which were discriminated as areas without restriction for use and as areas of environmental protection or industrial zones. In this map, the extent of the trace alternatives intercept each aptness class, was obtained. This study was performed in cooperation with São Paulo State Road Department ("Desenvolvimento Rodoviário S.A". - DERSA), which supplied technical and operational support.

SUMÁRIO

pág.

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO	17
CAPÍTULO 2 - FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	19
2.1 - Planejamento de Rodovias	19
2.2 - Sensoriamento Remoto	23
2.3 - Sistemas de Informações Geográficas	28
2.3.1 - SIG Aplicado a Atividades de Planejamento	28
2.3.2 - Representação de Dados em SIG	30
2.4 - Processamento de Imagens	36
2.5 - Mapeamento do Uso e Cobertura da Terra	39
CAPÍTULO 3 - ÁREA DE ESTUDO	45
3.1 - Rodoanel Metropolitano de São Paulo	45
3.2 - Caracterização da Área de Estudo	47
3.2.1 - Uso e Cobertura da Terra	49
3.2.2 - Áreas de Uso Restrito	50
3.2.3 - Geologia e Geomorfologia	53
CAPÍTULO 4 - MATERIAIS E MÉTODOS	59

4.1 - Materiais	59
4.2 - Metodologia	60
CAPÍTULO 5 - RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	67
5.1 - Mapeamento do Uso e Cobertura da Terra.....	67
5.1.1 - Análise Visual das Fotografias 35 mm	67
5.1.2 - Análise Visual da Imagem TM	79
5.1.3 - Processamento de Imagens	80
5.1.4 - Montagem e Manipulação do Banco de Dados.....	85
5.1.5 - Alternativa de Traçado Proposta	103
CAPÍTULO 6 - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	107
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	115

LISTA DE FIGURAS

	pág.
2.1 - O espectro eletromagnético e suas regiões.....	24
2.2 - Esquema de imageamento do sistema sensor TM-Landsat	26
2.3 - Assinaturas espectrais de alvos comuns na superfície terrestre	27
2.4 - Esquema de aplicação de um SIG num processo de planejamento	29
2.5 - Esquema de aplicação de um SIG ao planejamento rodoviário.....	30
2.6 - Representações de uma superfície de terreno: curvas de nível, grade regular e rede triangular.....	31
2.7 - Exemplo de como uma imagem pode ser representada digital e visualmente	32
2.8 - Modelos de representação matricial e vetorial	33
2.9 - Esquema conceitual de integração de dados utilizado neste trabalho	34
2.10 - Integração de informações geográficas através de operação algébrica pontual	35
3.1 - Situação do Rodoanel na Região Metropolitana de São Paulo	46
3.2 - Localização da área de estudo com as alternativas de traçado do Trecho Oeste do Rodoanel.....	48
3.3 - Áreas destinadas à preservação ambiental.....	51
3.4 - Zonas de Uso Preferencialmente Industrial (ZUPI's)	52
3.5 - Distribuição das unidades litológicas na área de estudo.....	54

3.6 - Perfis genéricos do Complexo Cristalino, que predomina na área de estudo e consiste de rochas magmáticas e rochas com estruturas xistosas	55
3.7 - Distribuição das unidades geomorfológicas na área de estudo	57
4.1 - Fluxograma com as etapas da metodologia	60
4.2 - Esquema de manipulação dos Planos de Informação para obtenção do mapa de aptidão física da região à implantação de uma rodovia	64
4.3 - Etapas necessárias para a obtenção do mapa de declividades	65
5.1- Variação interna da área urbana observada nas divisas entre os municípios de Barueri e Santana de Parnaíba e de Osasco e Carapicuíba	68
5.2 - Zona industrial em Barueri	68
5.3 - Implantação de loteamentos de baixo padrão em Carapicuíba e de alto padrão em Santana de Parnaíba	70
5.4 - Áreas residenciais de padrão baixo, médio e alto	71
5.5 - Relações entre padrão e densidade de ocupação	72
5.6 - Exemplo de área ocupada por sítios e chácaras no município de Embu	73
5.7 - Clube no município de Barueri	73
5.8 - Instituição religiosa em Carapicuíba	74
5.9 - Favela em Osasco	74
5.10 - Conjunto habitacional com unidades unifamiliares, em Osasco, e unidades multifamiliares verticais, em Carapicuíba	75

5.11 - Loteamento de baixo padrão no distrito paulistano de Anhangüera	75
5.12 - Aterro sanitário no distrito paulistano de Perus	76
5.13 - Plantio de Eucalipto e residências em áreas de floresta.....	76
5.14 - Floresta secundária típica	77
5.15 - Exemplo de formação arbórea com baixa densidade de cobertura.....	77
5.16 - Reflorestamento de Eucalipto em Santana de Parnaíba.....	78
5.17 - Comparação entre a banda TM 7 e uma foto aérea vertical, sem escala	80
5.18 - Setor da banda TM 7, após segmentação	82
5.19 - Segmentação de um telhado de indústria na banda TM 7.....	82
5.20 - Exemplo de alvo localizado sem muita precisão na banda TM 7.....	83
5.21 - Áreas residenciais no município de Barueri.....	84
5.22 - Exemplos de variação de aspectos entre alvos semelhantes	85
5.23 - Mapa de uso e cobertura da terra, obtido por processamento digital da imagem TM-Landsat	88
5.24 - Mancha urbana obtida por reclassificação do mapa de uso e cobertura da terra.	89
5.25 - Mapa de feições especiais obtido pela integração dos mapas de geologia, mancha urbana e geomorfologia	91
5.26 - Esquema de obtenção do mapa temático de declividade a partir do MNT.....	92
5.27 - Mapa de declividades obtido conforme esquema da Figura 5.26	93

5.28 - Sequência operacional utilizada na produção do mapa-síntese de aptidão física...	95
5.29 - Mapa-síntese de aptidão física, obtido pela integração dos mapas básicos.....	97
5.30 - Mapa-síntese de aptidão física destacando áreas de uso restrito	99
5.31 - Integração entre a classe de muito baixa aptidão física e dados de altimetria	102
5.32 - Alternativa de traçado definida sobre o mapa de aptidão física e ajustado sobre os mapas de topografia e de uso e cobertura da terra.....	103

LISTA DE TABELAS

	pág
2.1 - Avaliação dos critérios de seleção	22
2.2 - Matriz final de avaliação.....	22
2.3 - Regiões do espectro eletromagnético utilizadas pelos sensores passivos e ativos	24
2.4 - Resoluções do sensor TM-Landsat	25
2.5 - Sistema de classificação do uso e cobertura da terra para imagens orbitais.....	43
4.1 - Mapas temáticos e dados digitais utilizados.....	59
5.1 - Sistema de classificação do uso e cobertura da terra para a área de estudo.....	69
5.2 - Qualificação do uso e cobertura da terra.....	87
5.3 - Qualificação das feições especiais.....	90
5.4 - Pontuação das classes de declividade.....	92
5.5 - Relações utilizadas no processo de fatiamento	96
5.6 - Definição das classes de aptidão.....	96
5.7 - Área plana das classes de aptidão física	98
5.8 - Avaliação da alternativa Interna (Rotas 1 e 3)	100
5.9 - Avaliação da alternativa Intermediária (Rotas 2 e 3).....	100

5.10 - Dados de análise das alternativas de traçado	101
5.11 - Comparação entre o traçado proposto e o segmento correspondente da alternativa Interna	104
5.12 - Áreas interceptadas de muito baixa aptidão física	105

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

O planejamento do traçado de uma rodovia requer um amplo e extenso trabalho multidisciplinar de investigação das características físicas da região onde se pretende implantá-la. Considera-se, dentre outros, aspectos fisiográficos, ambientais, sociais, institucionais, políticos e funcionais da região, a fim de se definir o traçado ótimo.

O objeto do presente trabalho é o Rodoanel Metropolitano de São Paulo, um anel viário concebido como uma alternativa ao tráfego de passagem pelo centro da Região Metropolitana de São Paulo e destinado a estruturar o transporte urbano, que será implantado em áreas de ocupação urbana densa e de preservação ambiental. Sua necessidade ficou evidenciada em 1997, quando a ameaça de ruína da estrutura de uma ponte que transpõe o rio Tietê e suas vias marginais (Ponte dos Remédios), levou à interdição do tráfego sob e sobre a mesma, causando engarrafamentos, trânsito lento e prejuízo à população. Tais problemas poderiam ter sido amenizados caso o Rodoanel fosse uma alternativa ao tráfego das vias marginais já naquela época.

As técnicas de Sensoriamento Remoto fornecem meios para o levantamento atualizado de recursos físicos (topografia, solos, minérios, água e biota), que têm influência considerável em projetos de engenharia civil, nos quais a tomada de decisões deve garantir a sua viabilidade e otimizar a relação entre funcionalidade e custo/benefício.

Neste trabalho, uma imagem orbital TM-Landsat é utilizada no levantamento do uso antrópico (atividade humana) e da cobertura vegetal na região onde será implantado o Trecho Oeste do Rodoanel, ajudando na análise de alternativas de traçado definidas pelo Desenvolvimento Rodoviário S.A. (DERSA) para o Trecho Oeste do Rodoanel.

Este trabalho tem como objetivo subsidiar o processo de investigação realizado na fase de reconhecimento de um Projeto Rodoviário, utilizando uma imagem orbital, fotos

aéreas e um Sistema de Informações Geográficas (SIG)¹, considerados os seguintes objetivos específicos:

- 1) efetuar um mapeamento de uso e cobertura do solo, destacando feições de interesse do projeto rodoviário mencionado, a partir do processamento de imagens orbitais digitais;
- 2) produzir, em SIG, um mapa de aptidão física à implantação de uma rodovia, a partir da integração de informações geográficas de interesse ao planejamento de seu traçado (geologia, geomorfologia, uso e cobertura da terra, áreas de uso restrito);
- 3) encontrar a melhor opção de traçado, considerando duas alternativas definidas pela DERSA, para o Trecho Oeste do Rodoanel e usando os critérios de avaliação utilizados por essa Empresa.

¹ A utilização do SIG é apresentada nas páginas 28 e seguintes.

CAPÍTULO 2

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste Capítulo é apresentado o embasamento teórico das técnicas de sensoriamento remoto e geoprocessamento incorporadas, neste trabalho, ao planejamento rodoviário. Para tanto, são apresentados aspectos fundamentais do planejamento de rodovias, sensoriamento remoto e SIG.

2.1 PLANEJAMENTO DE RODOVIAS

O planejamento rodoviário é apresentado por Campos (1979) como sendo composto de três fases distintas, *reconhecimento*, *exploração* e *locação*:

- ✧ na fase de reconhecimento é realizado um breve exame de uma faixa de estudo definida entre os locais de origem e destino da rodovia, objetivando definir o melhor traçado. O produto desta fase é denominado *anteprojeto*;
- ✧ a exploração consiste no detalhamento, em escala 1:2.000, de uma faixa de terreno com largura de 200 a 300 m, envolvendo o anteprojeto. Desta atividade resulta o *projeto*;
- ✧ a locação corresponde à demarcação física do projeto, cravando-se piquetes de madeira e estacas de identificação no terreno, ao longo da linha de projeto. Ao produto desta fase dá-se o nome de *projeto definitivo*.

O presente trabalho está inserido na primeira fase do projeto rodoviário, na qual é definida a melhor ligação entre os locais de origem e destino, consideradas as características físicas e geométricas da rodovia e as peculiaridades do terreno na faixa de estudo. Para tanto, confecciona-se um sistema cartográfico a partir de levantamentos aerofotogramétricos e coleta de informações geotécnicas, ambientais, sociais, políticas, funcionais e institucionais, além de outras. Identifica-se os locais favoráveis e as áreas críticas à implantação da rodovia, definindo-se todas as possíveis alternativas de traçado. As melhores são objeto de análises ambientais e técnico-econômicas preliminares,

selecionando-se a que apresenta a melhor relação entre funcionalidade, custo-benefício e potencial de ocorrência de impactos. O traçado selecionado, denominado anteprojeto, é estudado com maior detalhe na fase de projeto subsequente (Campos, 1979; Vetec Engenharia, 1994; Bellia e Bidone, 1993).

Conforme Bellia e Bidone (1993), toda obra de engenharia interfere no meio ambiente gerando modificações no seu condicionamento/funcionamento. Assim, é necessário que um projeto de obras consista num planejamento ambiental com o objetivo de combinar a apropriação dos recursos com a perpetuação de seu potencial de geração do desenvolvimento, avaliando-se os impactos ambientais² causados pelo empreendimento. Neste sentido, Brasil (1986) determina a realização do Estudo de Impacto Ambiental (EIA) e a elaboração do Relatório de Impacto Ambiental (RIMA), como condição prévia ao licenciamento de diversos tipos de obras, incluindo as estradas. Maiores informações a respeito podem ser encontrados em Bellia e Bidone (1993) e Brasil (1986).

De acordo com Ross (1995), as pesquisas ambientais destinadas ao planejamento consistem em estudos e prognósticos realizados por equipes multi-disciplinares, que geram produtos com forte contribuição mútua entre os dados temáticos de ciências ambientais (geociências e biociências) e sociais (ciências humanas):

- ✧ no campo das Geociências os critérios para identificar áreas favoráveis e/ou impróprias à implantação de obras de engenharia são definidos a partir do conhecimento da geologia, geomorfologia, pedologia, climatologia e recursos hídricos (Pires Neto, 1994);
- ✧ o campo de Biociências envolve pesquisas da flora e da fauna para o entendimento da funcionalidade dos ecossistemas e geossistemas, evitando ações que venham a prejudicar o equilíbrio ambiental;

² Brasil (1986) define impacto ambiental como qualquer alteração das propriedades físicas, químicas e biológicas do meio ambiente, afetando o bem-estar da população, as atividades sociais e econômicas, as condições estéticas e sanitárias do meio ambiente e a qualidade dos recursos naturais.

✧ no campo das Ciências Humanas (história, cultura, relações sociais e econômicas), é de vital importância o conhecimento adequado da realidade sócio-econômica da comunidade que se objetiva analisar. Isso se consegue através da pesquisa de sua história econômico-social e do levantamento do uso atualizado da terra e dos recursos naturais em geral.

Dentro das três áreas do conhecimento citadas acima, no presente trabalho foram considerados os seguintes aspectos como sendo de relevância ao projeto rodoviário:

- ✧ áreas de várzea sem capacidade de suporte do leito rodoviário e relevos com grandes amplitudes altimétricas e encostas íngremes, propensos a desenvolver processos atuantes sobre cortes, aterros e encostas naturais, com riscos futuros de deslizamento, erosão e queda de pedras ou blocos;
- ✧ áreas cobertas por florestas nativas ou destinadas à preservação ambiental, onde o estabelecimento de planos e programas é causa de invasões, destruição e poluição de reservas existentes ou potenciais;
- ✧ áreas urbanas com alta densidade de ocupação e áreas industriais, onde a interferência modifica o uso e a ocupação do solo, causa segregação urbana e desapropriações, além de requerer a construção de obras de arte, onerando a obra.

Um modelo conceitual para o processo de seleção da alternativa de traçado é apresentado por Vetec Engenharia (1994) e consiste em análises e conclusões sobre aspectos técnicos, ambientais, sociais e de custos previstos, sendo elaborados indicadores para os critérios técnico, ambiental, risco ambiental, social e de custo:

- ✧ no critério técnico considera-se a qualidade do projeto, a necessidade de obras especiais, facilidades construtivas e a estabilidade da obra na fase de operação da via;
- ✧ no critério ambiental observa-se o meio físico (relevo, solo e sub-solo) e o meio antrópico (uso e ocupação do solo e áreas de conservação ambiental);

- ✧ no critério risco ambiental considera-se a probabilidade de ocorrer acidentes, representada pela presença de curvas e túneis, quantidade de pontes, extensão de rampa e fenômenos geotécnicos; e as suas consequências, representadas pela presença de áreas de uso rural, concentração urbana/industrial, unidades de conservação ambiental e comprometimento de recursos hídricos;
- ✧ no critério social são considerados os impactos referentes às desapropriações de imóveis e ruptura do tecido urbano.

As alternativas de traçado são conceituadas face aos critérios mencionados acima, variando desde desfavoráveis (pior situação) até extremamente favoráveis (melhor situação), que por sua vez são associados a notas na escala de 1 a 5 (Tabela 2.1). Estes valores compõem uma *matriz final de avaliação* (Tabela 2.2), na qual a melhor alternativa é distinguida pela totalização dos pontos.

TABELA 2.1 - AVALIAÇÃO DOS CRITÉRIOS DE SELEÇÃO

Conceito	Nível de restrição	Pontuação	Descrição da conceituação
Extremamente favorável	sem restrições	5	a alternativa não apresenta qualquer restrição à sua construção e operação.
Muito favorável	com poucas restrições	4	a alternativa apresenta algumas restrições perfeitamente contornáveis.
Favorável	com restrições	3	apresenta restrições contornáveis através de soluções corriqueiras de engenharia que minimizem ou eliminem efeitos negativos.
Pouco favorável	com mais restrições	2	há um maior comprometimento do projeto, necessitando soluções de engenharia mais complexas.
Desfavorável	desaconselhável	1	desaconselha-se a execução face à exigência de soluções complexas de engenharia.

TABELA 2.2 - MATRIZ FINAL DE AVALIAÇÃO

Alternativa	Critério de avaliação				Total de pontos
	Técnico	Ambiental	Risco ambiental	Social	
Alternativa 1					
Alternativa 2					
⋮					
Alternativa n					

É então implementado o critério de custo, que considera o nível de investimentos necessários para a implantação e manutenção da via. Este critério é utilizado como um fator de apoio à tomada de decisão, por permitir simular situações diversas e verificar a possibilidade de alteração da hierarquia dos traçados da matriz final de avaliação. Cabe ao analista ponderar as condições físico-financeiras apresentadas, tendo em vista as condições desejáveis de técnicas construtivas, preservação dos ambientes social e ambiental e a disponibilidade de financiamento para o empreendimento.

De acordo com Ross (1995), o processo de avaliação multi-criterial de uma rodovia pode ser realizado a partir de dados obtidos por sensores remotos e levantamentos de campo, de onde se extrai informações da natureza e da sociedade, envolvendo processos convencionais de cartografia temática ou processos informatizados (SIG). Aplicações destas ferramentas na área do planejamento rodoviário podem ser encontradas em Sharada et al. (1997), Sousa (1996), Autún et al. (1993) e Lucharevski (1993).

2.2 SENSORIAMENTO REMOTO

No passado, os métodos de investigação do terreno na faixa de estudo eram baseados em meios terrestres e foram aperfeiçoados pelo levantamento aerofotogramétrico³. Atualmente, imagens orbitais provêm uma boa base para um mapeamento não refinado do terreno, enriquecido posteriormente pelo uso de fotografias aéreas (Kennie e Matthews, 1985).

Tanto fotografias aéreas quanto imagens orbitais são dados de sensoriamento remoto, que consistem em coletar informações de objetos (alvos) sem haver contato físico. Em sensoriamento remoto estuda-se o ambiente físico terrestre, do qual se mede a radiação refletida ou emitida por sua superfície, ao longo do espectro eletromagnético⁴ (Figura 2.1), através de sistemas sensores instalados em campo, aeronaves ou satélites.

³ Maiores informações sobre aerofotogrametria podem ser obtidas em Paine (1981) e em Maia (1975).

⁴ Regiões distintas no espectro eletromagnético são conhecidas como bandas espectrais e são determinadas por variações no comprimento de onda ou frequência da energia eletromagnética.

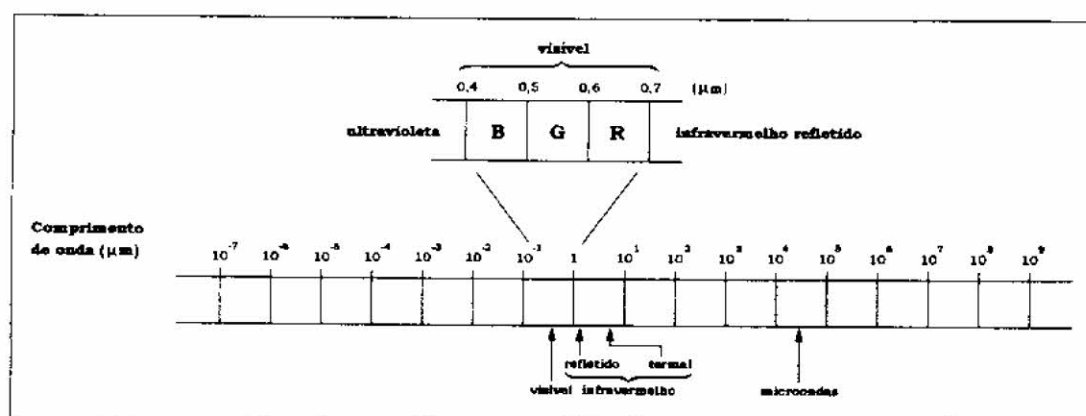


Fig. 2.1 - O espectro eletromagnético e suas regiões.

FONTE: adaptada de Kennie e Matthews (1985, p. 3).

Os sensores remotos realizam medidas em diferentes intervalos do espectro eletromagnético e de maneiras distintas, podendo ser classificados em passivos e ativos (Tabela 2.3). O sensor passivo mede a radiação solar refletida pela superfície terrestre e também a radiação termal emitida pela Terra, enquanto o sensor ativo (radar) mede a radiação relativa à faixa de microondas, que é emitida pelo sistema sensor instalado na plataforma orbital, medindo-se a intensidade do retorno desta energia, após refletida na superfície terrestre. Neste trabalho são utilizados produtos obtidos por sensores passivos, nas faixas espectrais do visível e do infravermelho próximo.

**TABELA 2.3 - REGIÕES DO ESPECTRO ELETROMAGNÉTICO
UTILIZADAS PELOS SENSORES PASSIVOS E ATIVOS**

Sistema sensor	Intervalo espectral	Banda espectral
Passivo	Ultravioleta	0,10 a 0,39 μm
	Visível	0,39 a 0,76 μm
	- azul	0,39 a 0,5 μm
	- verde	0,5 a 0,6 μm
	- vermelho	0,6 a 0,76 μm
	Infravermelho	0,76 a $10^3 \mu\text{m}$
	- próximo	0,76 a 3,0 μm
	- médio	3,0 a 6,0 μm
	- distante (ou termal)	6,0 a $10^4 \mu\text{m}$
Ativo	Microondas	10^3 a $10^6 \mu\text{m}$

FONTE: adaptada de Kennie e Matthews (1985).

Os sistemas sensores remotos também podem ser caracterizados pelas resoluções espectral, espacial, radiométrica e temporal:

- ✧ resolução espectral: corresponde ao número e ao intervalo das bandas espectrais medidas pelo sistema sensor. Possibilita o estudo de objetos da superfície terrestre em função de suas propriedades espectrais;
- ✧ resolução espacial: é descrita pela dimensão do "pixel", equivalente a metros na superfície terrestre. Corresponde à capacidade dos sensores detectarem objetos terrestres de diferentes dimensões e formas;
- ✧ resolução radiométrica: é expressa em termos do número de "bits" necessários para se representar o intervalo de intensidade da reflectância disponível na cena imageada. Corresponde, portanto, à quantidade de níveis de cinza ou níveis digitais com os quais a imagem é representada;
- ✧ resolução temporal: corresponde ao número de dias necessários para se repetir o imageamento de uma determinada área. É de utilidade para o monitoramento de mudanças do ambiente terrestre.

As resoluções do sistema sensor TM-Landsat (ou apenas TM, de Thematic Mapper) são apresentadas na Tabela 2.4. O programa Landsat foi iniciado pela NASA em 1972 para o levantamento dos recursos terrestres e marca o início do uso de imagens orbitais para fins não-militares. Informações a respeito podem ser encontradas em PE&RS (1997).

TABELA 2.4 - RESOLUÇÕES DO SENSOR TM-LANDSAT

Banda	Resolução espectral (μm)	Resolução espacial (m)	Resolução temporal	Resolução radiométrica
TM 1 - visível	0,45 a 0,52	30	16 dias	8 bits
TM 2 - visível	0,52 a 0,60	30		256 níveis de cinza
TM 3 - visível	0,63 a 0,69	30		
TM 4 - IV próximo	0,75 a 0,90	30		
TM 5 - IV próximo	1,55 a 1,75	30		
TM 7 - IV próximo	2,08 a 2,35	30		
TM 6 - IV termal	10,40 a 12...50	120		

FONTE: adaptada de Kennie e Matthews (1985, p. 62-67).

Além das imagens TM, o sensoriamento remoto conta com as resoluções espaciais de 20 e 10 metros do sensor HRV do satélite francês SPOT, além da resolução de até 5,8 metros do sensor LISS-III do satélite indiano IRS, cujas imagens ainda não são comercializadas no Brasil. Para um futuro próximo, são previstos sistemas imageadores com resolução espacial inferior a 3 metros.

O mecanismo de imageamento do sensor TM é o Sistema Imageador de Varredura, composto por elementos detectores sensíveis a bandas espectrais específicas. Conforme mostra a Figura 2.2, os detectores de radiação visível e infravermelho são sensibilizados para cada ponto da cena em foco, mediante o auxílio de um espelho que oscila de forma tal que o terreno é percorrido linha após linha, permitindo que a cena inteira seja reconstituída por computador.

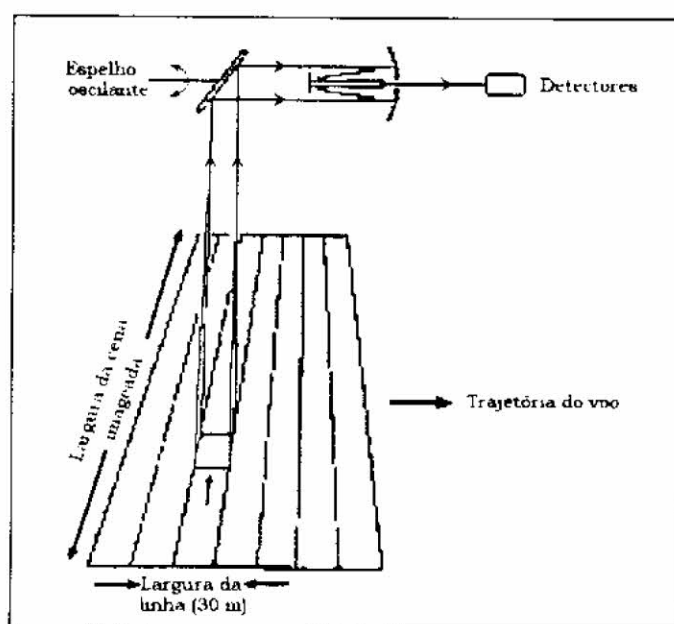


Fig. 2.2 - Esquema de imageamento do sistema sensor TM-Landsat.

FONTE: adaptada de Rees (1990, p. 11).

Segundo Kennie e Matthews (1985), a radiação incidente na superfície terrestre interage com a matéria, podendo ser refletida, absorvida e/ou transmitida, em proporções determinadas por propriedades físico-químicas e biológicas peculiares a cada objeto (alvo). A reflectância tem sido a propriedade espectral mais estudada em sensoriamento

remoto, sendo obtida através da radiância refletida pelos alvos, que pode ser inferida a partir de sensores e procedimentos adequados. Os objetos mais comuns da superfície terrestre possuem uma curva de reflectância típica, a *assinatura espectral*, que os caracteriza com relação ao comportamento espectral (Figura 2.3).

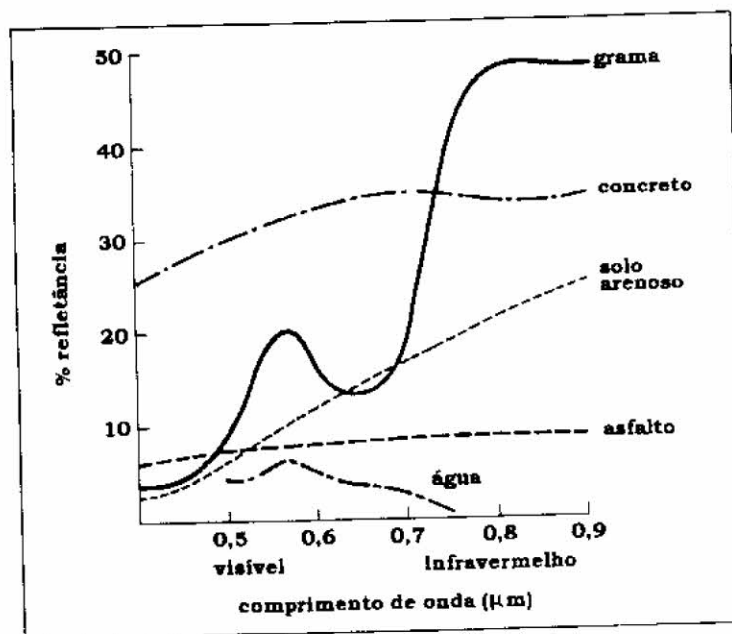


Fig. 2.3 - Assinaturas espectrais de alvos comuns na superfície terrestre.

FONTE: adaptada de Kennie e Matthews (1985, p. 9).

Curvas de reflectância obtidas para um mesmo tipo de alvo variam em função da interação entre a radiação eletromagnética e as propriedades do alvo, mas em geral, possuem forma próxima à da assinatura espectral. O comportamento espectral dos alvos diz respeito às propriedades bio-físico-químicas dos objetos da superfície terrestre e sua influência na interação com a energia eletromagnética. Esta compreensão auxilia na melhor interpretação da aparência dos alvos nas imagens orbitais, nas diferentes bandas espectrais em que são adquiridas, possibilitando o mapeamento da superfície terrestre.

Uma imagem orbital é coletada (pelo sistema sensor) e transmitida (para estações terrestres) em formato digital, podendo ser prontamente armazenada em computador,

processada no módulo de tratamento de imagens de um SIG e integrada a informações provenientes de outras fontes.

2.3 SISTEMAS DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS

O SIG, ferramenta fundamental no desenvolvimento da metodologia utilizada neste trabalho, é apresentado em duas etapas, abordando sua utilização conceitual em planejamento e a forma como a informação geográfica é representada neste sistema.

2.3.1 SIG Aplicado a Atividades de Planejamento

Por SIG entende-se um sistema computacional para manipulação de informações geográficas que, de acordo com Câmara (1995), pode ser utilizado:

- ✧ para compor e gerenciar uma base de dados geográficos composta por informações provenientes de diversas fontes (mapas, dados de censo, cadastro urbano e rural, imagens de satélite);
- ✧ para a análise espacial de fenômenos, pela consulta, recuperação, visualização e combinação de variáveis que descrevem o ambiente geográfico, e;
- ✧ para a produção cartográfica (pelo registro de dados geográficos, que podem ser acessados de forma rápida e simplificada).

Num âmbito de planejamento e de tomada de decisões, a utilização de um SIG requer a elaboração de um modelo conceitual do mundo real que, baseado na coleta de dados relevantes ao estudo, busca descrever e entender o fenômeno estudado, simplificando a realidade e permitindo efetuar raciocínios que amparem a tomada de decisões e a implementação de ações. Um esquema de análise geográfica em SIG (Figura 2.4) é apresentado por Aronoff (1989), onde as atividades iniciam e terminam no mundo real, de onde informações são coletadas, depuradas e organizadas num banco de dados, sendo então manipuladas e analisadas com o objetivo de se tomar decisões e se predizer corretamente os resultados decorrentes das ações que serão implementadas.

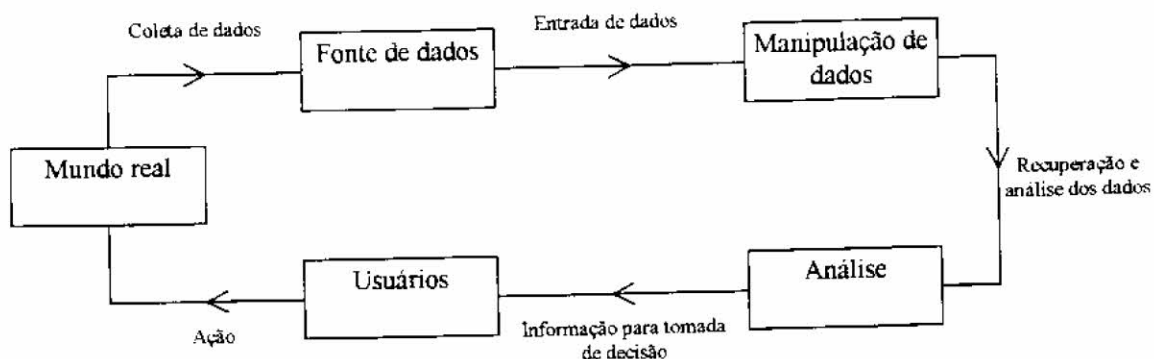


Fig. 2.4 - Esquema de aplicação de um SIG num processo de planejamento.

FONTE: adaptada de Aronoff (1989).

Conforme Aronoff (1989) quatro fatores determinam o sucesso na utilização de um SIG: o conjunto de informações selecionadas, a organização dos dados, o modelo conceitual elaborado e o critério de análise:

- ❖ o conjunto de dados utilizado em SIG consiste necessariamente de abstrações da realidade, sobre as quais se desenvolve o raciocínio de planejamento, devendo ser coletadas apenas as informações mais relevantes ao projeto;
- ❖ a organização da base de dados constitui um sistema simples que permite a entrada, a armazenagem e a recuperação dos dados;
- ❖ o modelo conceitual consiste em abstrações, generalizações e aproximações que representam um objeto ou fenômeno que existe no mundo real. Um bom modelo é aquele que prediz o comportamento do mundo real para o fenômeno de interesse, de forma correta e consistente, ajustando-se aos resultados da realidade;
- ❖ o critério de análise importa não apenas para a tomada de decisão referente à seleção da melhor dentre as opções de ação sob aspectos específicos, mas também para o conhecimento das consequências decorrentes da opção feita, bem como, da determinação de ações preventivas que potencializem as consequências positivas e minimizem as negativas.

No presente trabalho, a utilização do SIG encontra-se voltada ao planejamento rodoviário, para o qual se pode estabelecer um esquema análogo ao apresentado na Figura 2.4. No esquema da Figura 2.5, a faixa de estudo corresponde ao mundo real, do qual são coletadas informações geotécnicas, ambientais e sócio-econômicas que, inseridas em SIG, são manipuladas, possibilitando identificar locais favoráveis e desfavoráveis à passagem da rodovia. Com base neste levantamento, são definidos todos os traçados possíveis para a ligação entre os locais de origem e destino, analisando-se as alternativas de traçado e selecionando-se a que será implantada na faixa de estudo, após concluídas as demais fases de projeto.

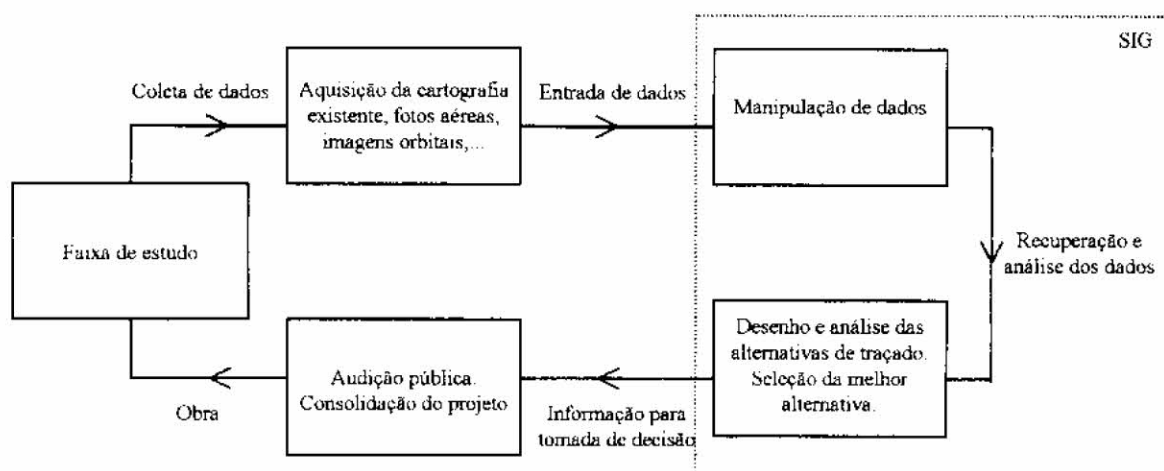


Fig. 2.5 - Esquema de aplicação de um SIG ao planejamento rodoviário.

FONTE: modificada de Aronoff (1989).

2.3.2 Representação de Dados em SIG

Um SIG permite a entrada, armazenagem, recuperação, manipulação, análise e saída de informações geográficas, descrevendo os objetos do mundo real em termos de duas componentes fundamentais: suas coordenadas e seus atributos, ou seja, as características dos objetos nestas coordenadas (Aronoff, 1986).

De acordo com Câmara (1995), as informações geográficas podem ser distinguidas nas categorias *temática*, *numérica* e *imagem*. A primeira compreende informações qualitativas referentes a um tema específico, a segunda compreende valores que

descrevem aspectos do mundo real, segundo regras pré-estabelecidas, e a terceira consiste em representações da medida da radiação eletromagnética emitida/refletida por uma área da superfície terrestre, realizada por um sensor remoto.

Variações contínuas do relevo definidas pela topografia são usualmente representadas por curvas de nível, que são linhas conectando pontos com igual valor de altitude. As curvas de nível são adequadas para representações cartográficas, mas não para representações numéricas da superfície, porque as isolinhas contêm uma quantidade excessiva de pontos amostrados, contrastando com a ausência de informação nos espaços entre estas linhas (Figura 2.6a). Os modelos de terreno adequados ao processamento digital são os *Modelos Digitais de Terreno* ou *Modelos Numéricos de Terreno*, nos quais os valores de altitude das curvas de nível são estruturados em uma *grade regular* (Figura 2.6b), de formato matricial, ou como rede triangular irregular (Figura 2.6c), “Triangulated Irregular Network” (TIN), de formato vetorial, consistindo em elementos triangulares cujos vértices correspondem aos pontos amostrais das curvas de nível.

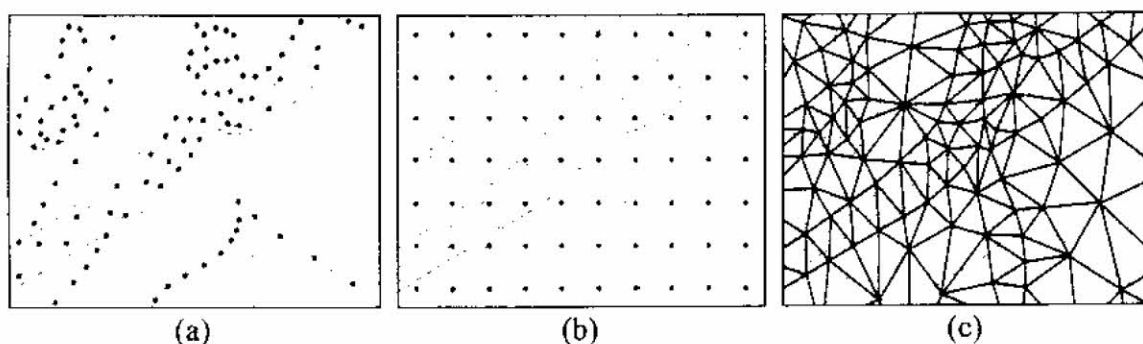


Fig. 2.6 - Representações de uma superfície de terreno: (a) curvas de nível, (b) grade regular e (c) rede triangular.

FONTE: modificada de Aronoff (1989, p. 122).

Uma imagem é constituída por uma matriz de “pixels” (“picture cells”) que pode ser apresentada tanto em formato digital, quanto em papel fotográfico. Como se observa na Figura 2.7, a cada “pixel” é atribuído um valor digital variando no intervalo de 0 a 255 e associado um nível de cinza, onde o valor 0 corresponde à cor preta e 255 à cor branca,

com uma gradação de 256 níveis de cinza. O nível de cinza é, portanto, representativo do valor médio da radiância refletida pelos objetos terrestres que compõem o elemento de superfície correspondente – “pixel” (Richards, 1986; Mather, 1987). Levando-se em conta a resolução radiométrica de uma imagem, cada “pixel” de uma banda possui uma correspondência espacial com um outro “pixel”, em todas as outras bandas, de forma que para uma imagem de K bandas, existem K níveis de cinza associados a cada “pixel”.

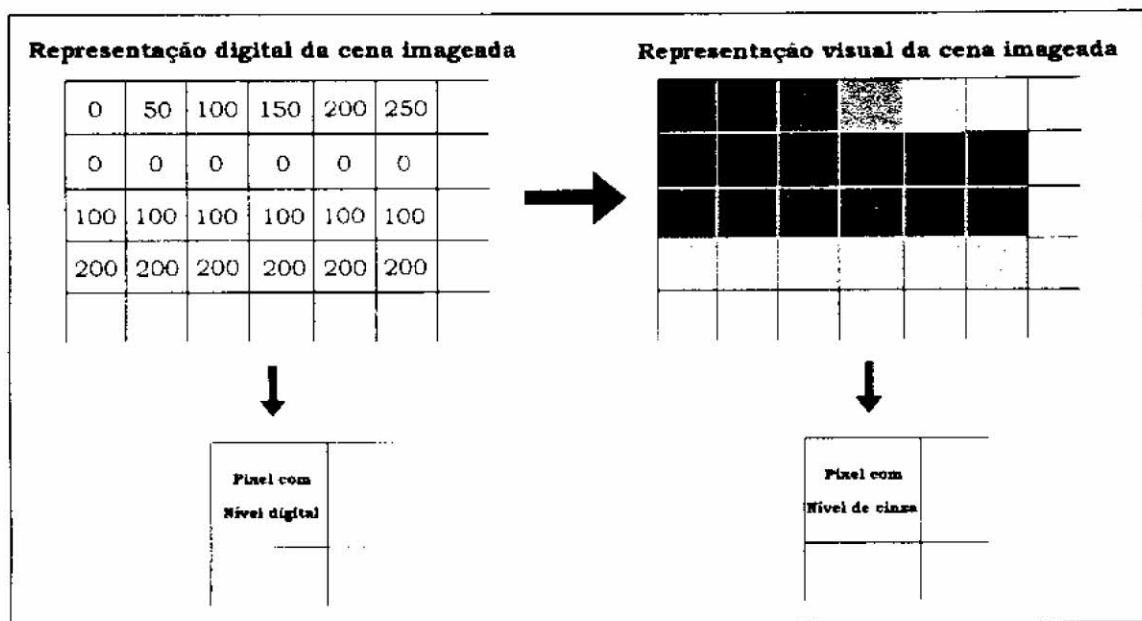


Fig. 2.7 - Exemplo de como uma imagem pode ser representada digital e visualmente.

Em SIG, as informações geográficas são representadas pelos formatos *matricial* ou *vetorial* (Figura 2.8), que permitem associações entre as componentes de localização espacial e atributos:

- ♦ na representação matricial, o espaço geográfico é tratado como uma superfície cartesiana plana, consistindo numa matriz de células, onde cada célula é referenciada por números de linha e coluna e contém um valor representativo do atributo do objeto mapeado (Figura 2.8b). A resolução ou escala da matriz é dada pela relação entre a dimensão de sua célula e sua dimensão na superfície do terreno, podendo ser igualada com a resolução de imagem orbital;

✧ a representação vetorial permite representar um objeto através de três entidades geográficas principais: pontos, linhas e áreas, que podem ser associadas a atributos dos objetos do mundo real (Figura 2.8c).

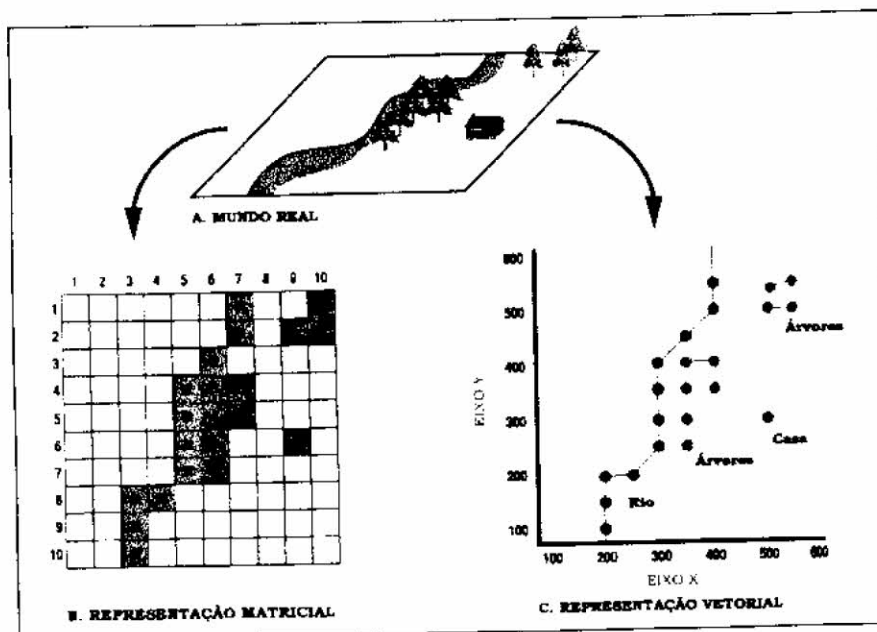


Fig. 2.8 - Modelos de representação matricial e vetorial.

FONTE: adaptada de Aronoff (1989).

De acordo com Barbosa (1997), análises em SIG envolvem operações realizadas sobre números e caracteres, de forma que se faz necessário descrever a realidade em forma matemática, considerando-se os dados geográficos como variáveis espaciais, ou seja, variáveis cujos valores estão associados a posições geográficas. Estas podem ser campo geográfico (geo-campo) ou objetos geográficos (geo-objetos):

- ✧ as variáveis da classe geo-campo são espacialmente contínuas, com valores definidos em todas as posições da região em estudo, como é o caso da topografia, geologia, geomorfologia, uso e cobertura da terra e áreas de uso restrito;
- ✧ as variáveis da classe de geo-objetos não são continuamente distribuídas em toda a área de estudo, como é o caso de rios e feições específicas distinguidas em uma imagem ou num mapa cadastral.

As variáveis da classe geo-campos são do tipo matricial e são geralmente utilizadas para representar fenômenos naturais, cuja transição entre diferentes domínios costuma ser tênue. Variáveis da classe geo-objeto possuem representação vetorial e são comumente utilizadas para representar atividades humanas, cujos limites costumam ser bem definidos, tais como demarcações de propriedade e limites políticos.

O modelo conceitual elaborado para a análise geográfica realizada neste trabalho contempla apenas variáveis espaciais da classe geo-campo e é apresentado no diagrama de blocos da Figura 2.9.

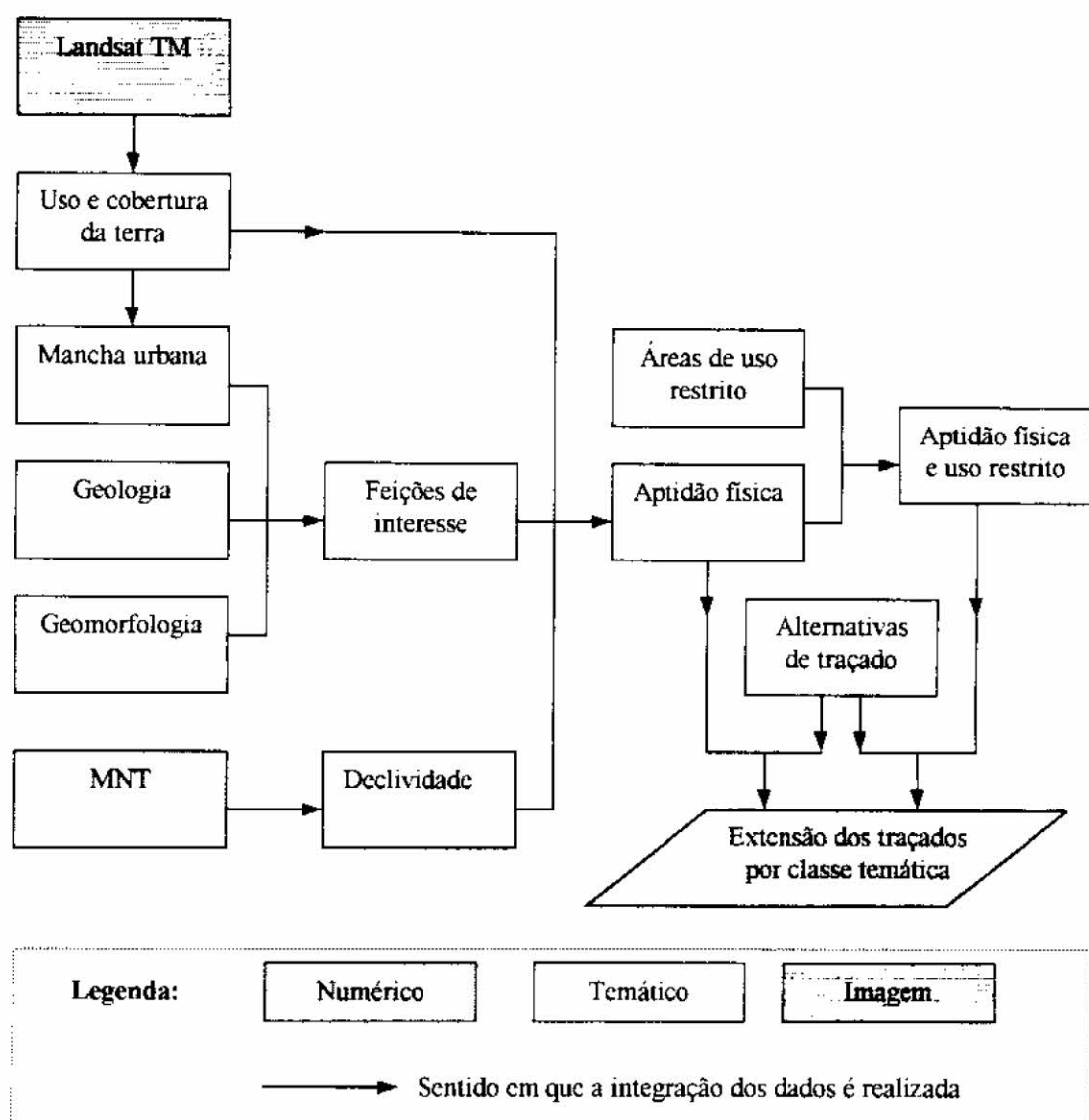


Fig. 2.9 - Esquema conceitual de integração de dados utilizado neste trabalho.

A integração de informações geográficas em SIG consiste em agrupar e/ou transformar a informação espacializada proveniente de diversas fontes (mapas, dados de levantamentos de campo e de sensores remotos, além de outros) por meio da *álgebra de mapas*, ou seja, na utilização de um conjunto de operadores para manipular dados de geo-campo. Desta maneira, as informações geográficas são reunidas para que se possa (1) determinar quais tipos de feições ocorrem num dado local, (2) procurar feições que possuam determinadas características e (3) monitorar as feições que variam com o tempo (Maguire, 1991; Shepherd, 1991). A integração de dados realizada neste trabalho enquadra-se no primeiro e no segundo caso e se utiliza de *operações algébricas pontuais* (Figura 2.10) para identificar áreas favoráveis e desfavoráveis à implantação de uma rodovia. Estas operações são pontuais porque são realizadas isoladamente para cada célula das matrizes de entrada (que podem ser tanto da categoria temática, quanto numérica e imagem).

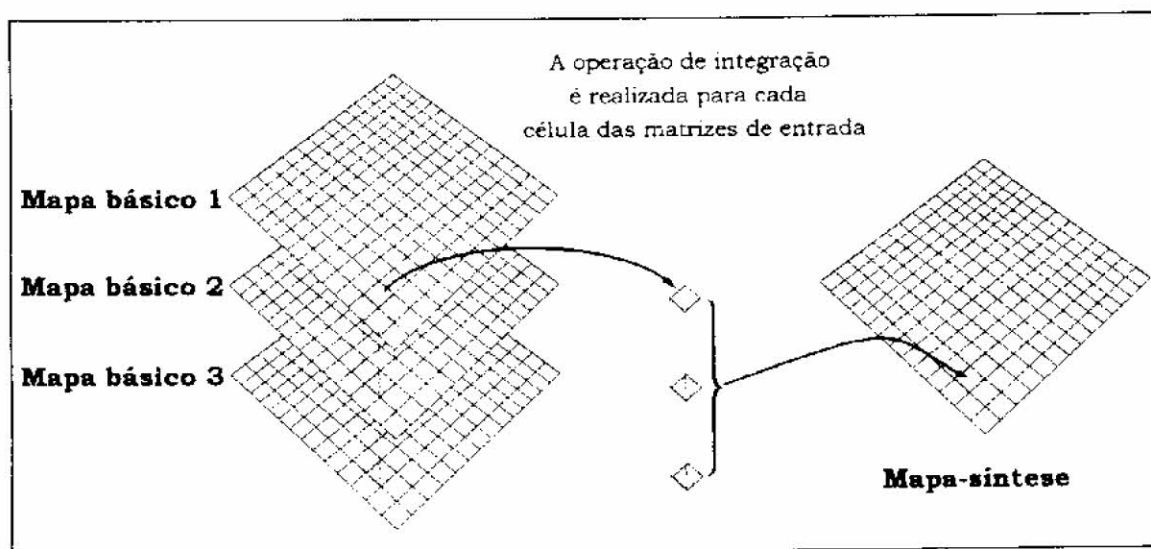


Fig. 2.10 - Integração de informações geográficas através de operação algébrica pontual.

FONTE: modificada de Aronoff (1989, p. 5).

As operações algébricas pontuais utilizadas neste trabalho são: *combinação booleana*, *ponderação*, *multiplicação*, *fatiamento* e *reclassificação*. Barbosa (1997) apresenta estas operações da seguinte forma:

- ✧ a combinação booleana, também denominada por operação de cruzamento, é realizada sobre dados temáticos e gera um mapa-síntese onde o valor em cada posição geográfica é o resultado da aplicação de um operador da lógica booleana (AND, OR, NOT, XOR) sobre os valores dos atributos na mesma posição geográfica dos mapas básicos (mapas temáticos de entrada) ;
- ✧ a ponderação transforma um dado temático em numérico segundo regras definidas pelo usuário, possibilitando o uso de operações matemáticas;
- ✧ a multiplicação é realizada sobre dados do tipo numérico (grade regular) e produz uma grade regular onde o valor resultante em cada posição geográfica é a multiplicação dos valores de entrada;
- ✧ o fatiamento transforma um dado numérico em temático, pela substituição de intervalos de valores por atributos temáticos, segundo regras pré-estabelecidas;
- ✧ a reclassificação agrega classes temáticas distintas, segundo regras definidas pelo usuário.

2.4 PROCESSAMENTO DE IMAGENS

O processamento de imagens orbitais consiste em operações computacionais realizadas para otimizar o processo de extração de informações, baseado na percepção de diferenças nos níveis de cinza, resultantes do comportamento radiométrico de cada alvo, produzindo-se mapas contendo determinadas características da região. Para a extração de informações de imagens orbitais pode-se proceder diversas operações computacionais, que de acordo com Venturieri (1996), compreendem as fases de pré-processamento, realce, segmentação e classificação. O limite entre estas fases não é claro, variando conforme a aplicação a que se destinam.

1) Técnicas de pré-processamento de imagens: de acordo com Mather (1987) e Richards (1986), em sua forma bruta, como recebida dos sistemas sensores orbitais, as imagens podem conter incorreções ou distorções, normalmente compensadas pela

aplicação de operações de pré-processamento. Estes defeitos podem ser erros radiométricos ou geométricos:

- ♦ os erros radiométricos consistem em degradações devidas a desajustes de calibração dos detectores, mau funcionamento esporádico do sensor, problemas na transmissão, recepção e registro dos dados, além de interferência na radiância por efeitos atmosféricos. A correção radiométrica é de utilidade em estudos de comportamento espectral ou que envolvem imagens obtidas em diferentes datas;
- ♦ os erros geométricos são distorções ocasionadas pela movimentação do satélite ou da Terra, bem como pela orientação do satélite com relação à superfície terrestre. A correção geométrica é realizada através da operação de *registro* ou *georeferenciamento*, que é aplicada para ajustar as imagens às coordenadas geográficas de um sistema de projeção cartográfica⁵ desejado. Este ajuste é necessário porque as informações da superfície terrestre representadas na imagem não estão originalmente associadas a coordenadas geográficas.

No processo de georeferenciamento, o usuário identifica pontos comuns (Pontos de Controle) entre a imagem da área de estudo, exibida em terminal de vídeo, e uma outra fonte de informação, que pode ser uma carta topográfica disposta sobre uma mesa digitalizadora ou Pontos de Controle obtidos via “Geographical Positioning System” (GPS). Quando estes pontos são posicionados na imagem com precisão, executa-se um algoritmo computacional que a rotaciona, fazendo com que estes pontos correspondam à mesma localização geográfica.

2) Técnicas de realce de imagens: melhoram a aparência da imagem para que as informações nela contidas sejam melhor interpretadas, de acordo com as necessidades

⁵ Os sistemas de projeção cartográfica são utilizados para se obter uma correspondência entre pontos da superfície terrestre e de um mapa ou um produto de sensor remoto orbital. Devido à curvatura da Terra, é inevitável que ocorram erros ao se representá-la numa superfície plana, de forma que o melhor produto que se obtém é ainda simplesmente uma representação aproximada da superfície terrestre (Santos, 1989).

específicas da análise pretendida. Conforme Mather (1987), três processos podem ser utilizados para realçar as imagens: alteração de contraste, operações de transformação da imagem e métodos de filtragem:

- ✧ a técnica de manipulação de contraste consiste na ampliação do histograma da imagem, o qual pode ser descrito como a frequência com que os níveis de cinza se repetem na mesma imagem. Na forma como são adquiridas pelo sensor, as imagens apresentam um histograma restrito a um pequeno intervalo de níveis de cinza, que pode ser ampliado para 256 unidades (intervalo de 0 a 255), gerando a imagem *contrastada*.

- ✧ as operações de transformação da imagem e os métodos de filtragem também podem ser utilizados para realçar imagens ou feições específicas nestas. Tais técnicas não forneceram resultados satisfatórios para este trabalho e portanto não constam da metodologia, não sendo aqui apresentadas. Informações a respeito podem ser obtidas em Mather (1987), Richards (1986) e Crósta (1992).

3) Técnicas de segmentação de imagens: segundo Bins et al. (1996), a técnica de segmentação consiste em fragmentar a imagem em regiões (segmentos) que delimitam os alvos da superfície terrestre representados na imagem. A cada segmento estão associados atributos de área, forma, textura e parâmetros estatísticos, que podem ser úteis em análises posteriores, como o processo de classificação da imagem. Os segmentos são delineados de modo a conterem “pixels” com níveis de cinza similares, resultando na separação dos diferentes alvos da superfície terrestre representados na imagem.

Para o delineamento dos segmentos, são utilizados os métodos de *detecção de bordas* e *identificação de regiões*. O método de detecção de bordas consiste em definir limites entre “pixels” com níveis digitais diferentes, na hipótese de que sejam delimitadas as regiões homogêneas na imagem; enquanto no método de identificação de regiões, utilizado neste trabalho, estas regiões são identificadas pela análise da similaridade entre “pixels” vizinhos. Neste método, pode-se aplicar a técnica de *crescimento de regiões*, na qual o segmento é formado pela aglomeração sucessiva de “pixels” vizinhos com níveis

de cinza similares. Para decidir em qual segmento agregar cada “pixel”, o algoritmo se utiliza da distância euclidiana e dos limiares de área e de similaridade, fornecidos pelo usuário. O limiar de área define a quantidade mínima de “pixels” que constitui cada segmento e o limiar de similaridade define a proximidade entre os níveis digitais destes “pixels”.

4) Técnicas de classificação de imagens: o processo de classificação pode ser efetuado “pixel” a “pixel”, ou para grupos de “pixels” compreendidos em segmentos de imagem, como é realizado neste trabalho. Neste processo, cada segmento é rotulado conforme as classes de uma legenda pré-definida, resultando num mapa temático. Este processo pode ser Não-Supervisionado, não havendo a participação do usuário, ou supervisionado, onde o usuário participa através do *treinamento*, que consiste em compor um espaço amostral com os segmentos mais representativos das classes da legenda do mapa temático que será obtido. Na classificação supervisionada, o algoritmo estima parâmetros estatísticos para os dados do treinamento, comparando-os com todos os segmentos da imagem e rotulando-os conforme a classe com a qual mais se assemelha. De acordo com Swain et al. (1971), a comparação entre segmentos pode consistir num processo matemático baseado na distância de Bhattacharyya, que se utiliza do vetor de média e da matriz de covariância como critério para a seleção automática de feições.

Quando da classificação de uma imagem, deve-se definir um índice de aceitação, determinando-se a probabilidade do segmento classificado como pertencente à classe x ser realmente pertencente a esta classe.

2.5 MAPEAMENTO DO USO E COBERTURA DA TERRA

Conforme Pereira et al. (1989), o termo *uso e cobertura da terra* pode ser definido como a ocupação do espaço por objetos naturais (cobertura da terra) ou por atividades desenvolvidas pelo homem (uso da terra). O conhecimento da distribuição espacial destes elementos é imprescindível no processo de tomada de decisões relativas à organização racional da atividade humana na superfície terrestre, como no caso do planejamento rodoviário, que necessita identificar áreas impactantes em potencial, a fim

de se evitá-las ou definir ações que atenuem os efeitos negativos que possam ser previstos.

A extração de informações das imagens orbitais é auxiliada pela elaboração de chaves de interpretação, nas quais os diferentes tipos de uso e cobertura da terra são caracterizados com o propósito de que se identificar feições semelhantes de forma precisa e objetiva em toda a imagem. Conforme Pereira et al. (1989), os alvos são caracterizados pela observação dos parâmetros de forma, tamanho, tonalidade, cor, textura, localização e relação de aspectos dos alvos.

As áreas de cobertura vegetal são caracterizadas pelo porte dos indivíduos (vegetação arbórea, arbustiva ou herbácea), pelo espaçamento entre estes indivíduos (confere diferentes densidades à cobertura) e pela variedade de espécies (confere textura homogênea ou heterogênea à área coberta). Estes parâmetros determinam variações no seu comportamento espectral médio, as quais correspondem a variações radiométricas nas imagens orbitais, possibilitando a distinção e o reconhecimento dos alvos.

A atividade humana na superfície terrestre está associada ao manejo da terra destinado ao plantio e à criação de animais, a atividades de mineração e às atividades desenvolvidas em áreas urbanas. O espaço urbano pode ser considerado como um intrincado mosaico de utilização do solo, onde as peças são diferenciadas por tipos de uso idealmente homogêneos. Geralmente, estas peças correspondem a áreas industriais, institucionais, comerciais, residenciais e de lazer, que por sua vez, apresentam edifícios de vários andares, construções horizontais, parques, estacionamentos, sistema viário, constituindo alvos de sensoriamento remoto com diversas dimensões e espaçamentos, construídos com diferentes materiais. A frequência com que estes materiais se alternam, determina mudanças consideráveis inter e intra "pixel", o faz desejável que as imagens orbitais possuam melhor resolução espacial para que o espaço intra-urbano seja devidamente detalhado (Costa, 1996; Jensen, 1983; Kurkdjian, 1986; Kurkdjian, 1990).

A escala ideal de trabalho de imagens TM é 1:100.000, mas podem ser utilizadas em estudos intra-urbanos se forem degradadas até escalas em torno de 1:25.000 e sua interpretação for auxiliada por informações obtidas a partir de outras fontes.

Seevers et al. (1993) investigaram em quais combinações de três bandas são melhor identificadas as feições intra-urbanas, além de outras. Para tanto, fizeram uso dos métodos de análise digital "Optimum Index Factor" (OIF) e volume de elipsóide e da interpretação visual realizada por quatro foto-intérpretes experimentados, encontrando que para a interpretação visual deve-se utilizar os conjuntos de bandas RGB TM 5, 4 e 3 e TM 2, 3 e 4, e para processamento digital, os conjuntos de bandas TM 1, 4 e 5 e a TM 1, 4 e 7. Convém observar que o conjunto de bandas TM que permite mapear melhor uma determinada região, não necessariamente corresponde ao conjunto com o qual se obtém o melhor mapeamento de uma outra região qualquer.

Segundo Hamburger (1993), as áreas homogêneas que compõem as cidades são caracterizadas por apresentar aspectos sócio-econômicos similares, descritos por classe social, salário, ocupação e grupo étnico. Assim, é possível estabelecer uma relação entre estas características e a ocupação espacial destas sub-áreas, a partir da análise inter-relacionada de fotografias de campo, fotografias aéreas ou imagens orbitais. O uso do solo urbano pode então ser mapeado com base na distribuição espacial de seus materiais componentes, conforme a intenção de se predizer o padrão sócio-econômico e a função predominante de cada sub-área.

A hipótese acima citada é confirmada por Kurkdjian (1986) que, utilizando fotografias aéreas na escala 1:10.000, verificou que setores residenciais homogêneos estão associados a ambientes residenciais de mesma qualidade, ocupados por grupos residentes com as mesmas características sócio-econômicas, sendo possível predizê-las a partir do conjunto de aspectos físicos destes setores, dentre os quais pode-se citar o tamanho médio dos lotes, área média construída, disponibilidade de jardim, piscina, arborização e pavimentação de ruas e calçadas.

A resolução espacial e a escala de trabalho das imagens orbitais causam a perda de muitos dos aspectos físicos mencionados acima, mas permite inferir a densidade de área construída e a presença de vegetação, que de acordo com Ceccato et al. (1993) e Ceccato (1994), estão relacionadas a padrões de renda e à qualidade de vida urbana⁶. Nestas imagens, é possível inferir as características sócio-econômicas dos diferentes segmentos da população pela presença da vegetação (à qual está diretamente associada) e pela densidade de construção (à qual está inversamente associada). Isto ocorre porque em áreas de maior padrão os terrenos são maiores e apresentam jardins, havendo um maior distanciamento entre as unidades habitacionais e uma maior presença de vegetação, notadamente de árvores, que também se fazem presentes ao longo dos arruamentos. Por sua vez, nas áreas de padrão mais baixo, as unidades habitacionais são construídas ocupando a quase totalidade dos lotes, o que aumenta a densidade de ocupação e reduz a presença de vegetação.

Trabalhando com imagens TM, Foresti e Pereira (1987) realizaram medidas da densidade de vegetação que possibilitaram diferenciar sub-áreas na área central de São Paulo, permitindo também delimitar o uso urbano do uso não-urbano, nas áreas urbanas desocupadas (vazios urbanos) e nas extremidades da ocupação urbana.

Objetivando orientar e compatibilizar os mapeamentos de uso e cobertura da terra em qualquer parte do planeta, Anderson et al. (1979) propuseram um sistema de classificação do uso e cobertura da terra no qual se considera que diferentes sensores provêem diferentes níveis de classificação. Na Tabela 2.5 são apresentadas as classes de uso e cobertura da terra observáveis em imagens orbitais, sendo indicadas aquelas que podem ser obtidas diretamente a partir das imagens de satélite (nível 1) e indiretamente, mediante auxílio de outros meios de informação (nível 2). As informações desta Tabela podem ser utilizadas na definição da legenda de mapas temáticos, tal como foi realizado

⁶ A qualidade de vida urbana é definida por parâmetros físicos, químicos e biológicos, que consistem em elementos do meio ambiente que influem direta e indiretamente na saúde humana, além de parâmetros sociais, que influem no comportamento humano (Troppe, 1992, citado por Ceccato, 1994).

por Pereira et al. (1988) no mapeamento da cidade de São José dos Campos, a partir de imagens TM.

TABELA 2.5 - SISTEMA DE CLASSIFICAÇÃO DO USO E COBERTURA DA TERRA PARA IMAGENS ORBITAIS

Nível 1 - imagens orbitais auxiliadas por alguma informação suplementar	Nível 2 - informações providas por imagens orbitais combinadas com mapas topográficos
Terra urbana ou construída	Residencial, comercial e serviços, industrial, vias de transporte e comunicação, complexos comerciais/industriais, área construída mista e terra urbana diversa ou construída.
Terra agrícola	Terra de cultura e pastagem plantada, pomares, bosques, vinhedos, viveiros, áreas de horticultura ornamental, atividades de criação confinada e outros tipos de cultura.
Campo natural	Pastagem herbácea, com vegetação arbustiva.
Terra florestal	Terra de floresta decídua, sempre verde e mista.
Água	Curso d'água e canais, lagos, reservatórios, baías e estuários.
Terra úmida	Terra úmida florestada e não florestada.
Terra árida	Planícies salgadas secas, praias, áreas com areia que não praias, rocha nua exposta, minas a céu aberto, pedreiras e minas de cascalho, áreas de transição e terra árida mista.
Tundra	Tundra de arbustos e macega, herbácea, solo nu, úmida e mista.
Neve ou gelo perene	Campos de neve perene e geleiras.

FONTE: adaptada de Anderson et al. (1979, p. 37-68).

Foresti (1986) realizou visitas de campo na mesma área de estudo deste trabalho, definindo as seguintes classes de uso da terra: área urbanizada, adensamento residencial, indústria, loteamento desocupado, loteamento parcialmente ocupado e terraplenagem.

Maiores informações a respeito do potencial de imagens TM para a extração de feições de uso e cobertura da terra podem ser obtidas em Anderson et al. (1979), Jensen (1983) e Pereira et al. (1989). A influência de alvos comuns à área urbana no comportamento espectral de diversos setores urbanos pode ser encontrado em Hamburger (1993).

Além dos trabalhos mencionados nesta seção, outros estudos urbanos envolvendo imagens TM podem ser encontrados em Carrara (1992), Costa (1989), Dmour e

Vaughan (1998), Pereira et al. (1994) e Vieira (1993). Aplicações de GIS em estudos urbanos são apresentadas em Parrott e Stutz (1991).

Simi Jr. (1998) tem realizado estudos de planejamento urbano em escala 1:10.000 no município de Caçapava-SP, utilizando imagens TM-Landsat (restauradas para “pixels” de dez metros e realçadas com filtros isotrópicos) e a imagem pancromática do sensor HRV-SPOT.

CAPÍTULO 3

ÁREA DE ESTUDO

Neste Capítulo é apresentado o Rodoanel e caracterizada a área de estudo quanto ao uso e cobertura da terra, às áreas de uso restrito, à geologia e a geomorfologia.

3.1 RODOANEL METROPOLITANO DE SÃO PAULO

De acordo com São Paulo (1997), o Rodoanel foi concebido como uma alternativa de tráfego para desviar a rota de veículos do centro da cidade de São Paulo, interligando as principais rodovias de acesso à metrópole. Será implantado num contexto urbano/ambiental, sendo conceituado como um instrumento de desenvolvimento urbano, preservação ambiental, racionalização do transporte e promoção da integração regional, conforme as seguintes diretrizes estabelecidas para o seu projeto e construção:

- ✧ evitar áreas com declividade acentuada e solo inadequado ao suporte do leito rodoviário;
- ✧ evitar áreas densamente ocupadas, para que não haja ruptura do tecido urbano e desapropriações;
- ✧ minimizar a interferência com parques, Áreas de Proteção Ambiental, Áreas de Proteção dos Mananciais e sistemas de drenagem natural;
- ✧ estar inserido em uma faixa entre 20 e 40 km do centro de São Paulo, uma vez que abaixo de 20 km encontra áreas urbanas densamente ocupadas e acima de 40 km torna-se menos atrativo ao tráfego;
- ✧ consistir em alternativa ao tráfego de passagem pela área central metropolitana, estando compatibilizado com os sistemas viários locais, de modo a integrar os meios de transporte rodoferroviários e favorecer o desenvolvimento urbano local e inter-regional;

❖ promover a organização do espaço urbano metropolitano pela integração de diretrizes metropolitanas às municipais, induzindo a expansão urbana a oeste e a leste da capital e inibindo a ocupação ao sul e ao norte.

A implantação do Rodoanel prevê a parceria do setor público em nível federal, estadual e municipal, com o setor privado, sendo executado por trechos, conforme indicado na legenda da Figura 3.1. O primeiro a ser construído será o Trecho Oeste, objeto deste estudo, enquanto os demais trechos encontram-se em fase de projeto e envolvem questões ambientais, por atravessarem Áreas de Proteção aos Mananciais, necessitando estudos para amenizar impactos nas fases de construção e de operação da rodovia.

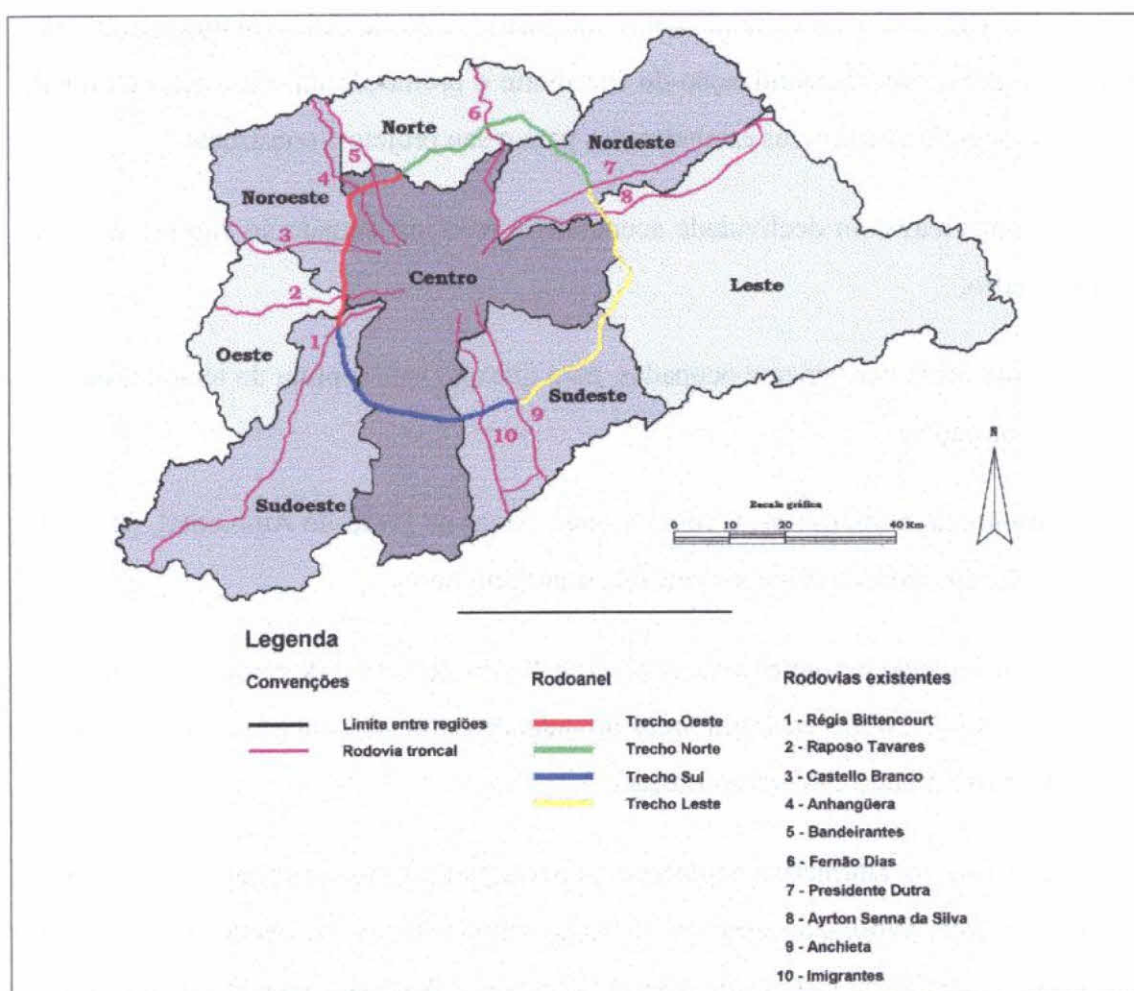


Fig. 3.1 - Situação do Rodoanel na Região Metropolitana de São Paulo.

FONTE: modificada de São Paulo (1997, p.11).

3.2 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo situa-se na região Noroeste da Região Metropolitana de São Paulo (Figura 3.1) e está localizada entre os meridianos 46° 54' W e 46° 45' W e os paralelos 23° 39' S e 23° 24' S (Figura 3.2), possui 405 Km², abrange a totalidade do município de Carapicuíba e parte dos municípios de Barueri, Cajamar, Cotia, Embu, Jandira, Osasco, Santana de Parnaíba, Taboão da Serra e os distritos paulistanos de Anhangüera, Jaraguá, Perus e São Domingos. Nesta área será implantado o Trecho Oeste do Rodoanel, que irá interligar as rodovias Régis Bittencourt, Raposo Tavares, Castello Branco, Anhangüera e Bandeirantes.

Na área de estudo encontram-se as alternativas de traçado *Interna* e *Intermediária*, que foram definidas pela DERSA e utilizadas na fase de reconhecimento do projeto do Rodoanel. Uma terceira alternativa, denominada *Externa*, está situada fora da área de estudo, já que para a sua inclusão seria necessário que a área de estudo fosse ampliada para o dobro do tamanho atual, fazendo necessária a aquisição de dados temáticos referentes a esta área e aumentando o esforço de investigação efetuado no presente trabalho. Estas três alternativas foram projetadas para se avaliar as possíveis vantagens e desvantagens decorrentes de se aproximar a rodovia do centro da metrópole, onde intercepta áreas urbanas densamente ocupadas, e de se distanciar deste centro, onde perde atratividade ao tráfego. A partir destes estudos, a DERSA selecionou a alternativa Interna para compor o Trecho Oeste do Rodoanel. Seu traçado definitivo difere do desenho apresentado na Figura 3.2, que data de 1992 e sofreu alterações desde então.

Neste trabalho, as alternativas de traçado foram subdivididas nas *rotas 1, 2 e 3*, onde a alternativa Interna equivale às rotas 1 e 3 e a Intermediária, às rotas 2 e 3. Os segmentos de traçado localizados além das rodovias Régis Bittencourt e Bandeirantes foram denominados *prolongamentos* e são apenas ilustrativos, embora o prolongamento além da Rodovia dos Bandeirantes, de 3,7 km, constitua efetivamente o Trecho Oeste do Rodoanel.

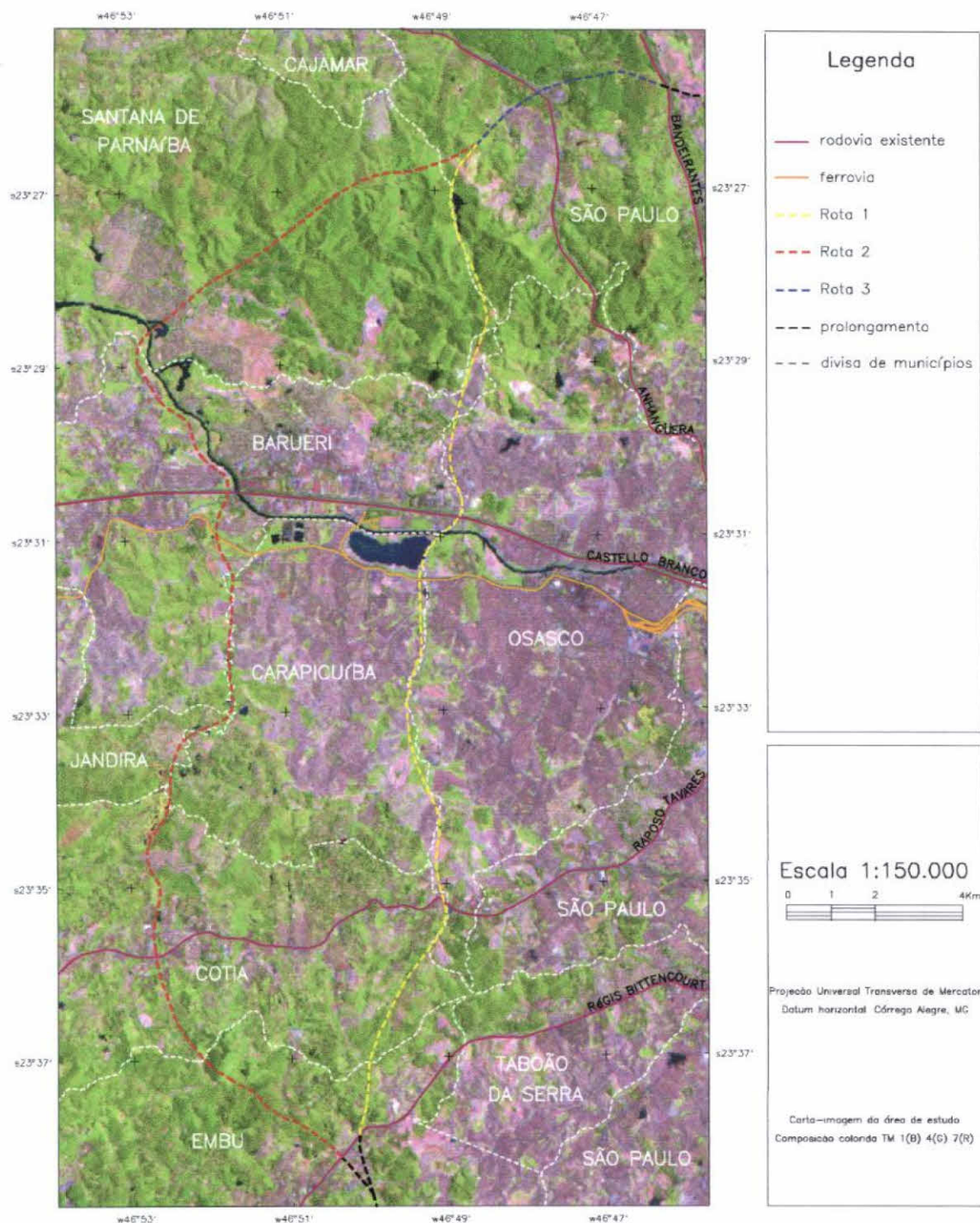


Fig. 3.2 - Localização da área de estudo com as alternativas de traçado do Trecho Oeste do Rododanel.

FONTE: modificada de DERSA (1992) e IGGSP (1972a, b).

Para o planejamento de uma rodovia é imprescindível caracterizar a região em estudo, visto que do conhecimento da distribuição, na superfície terrestre, das atividades antrópicas, das áreas de preservação ambiental e das unidades fisiográficas, decorre a escolha do melhor traçado, com aproveitando-se das facilidades do terreno e evitando-se áreas críticas à sua implantação, significando a economia de recursos financeiros e a preservação do meio ambiente.

3.2.1 Uso e Cobertura da Terra

A área de estudo apresenta uma mancha urbana contínua, resultante da intensa conurbação verificada a partir da década de 60 entre os municípios que compõem a Região Metropolitana de São Paulo, devido a altas taxas de crescimento populacional. Os problemas determinados pela dinâmica econômico-social da região extrapolam os limites municipais, motivo que determinou a institucionalização da região metropolitana como uma organização física, com delimitação própria e configuração política. Sua organização espacial é caracterizada pela variação interna em relação aos padrões sociais da população e por áreas destinadas ao uso industrial, apresentando grandes vazios urbanos, que geralmente correspondem a áreas de várzea (Foresti, 1986; São Paulo, 1997).

A vegetação natural primitiva foi substituída por outra resultante da ação do homem, apresentando estágios sucessionais de regeneração da flora natural (RADAMBRASIL, 1983; DEPRN, 1994). As áreas cobertas por floresta regenerada apresentam-se degradadas e alteradas por processos antrópicos diversos e estão distribuídas na região de forma descontínua, ocupando grandes áreas no norte da área de estudo, nos municípios de Santana de Parnaíba e Cajamar, e no distrito paulistano de Anhangüera e Jaraguá. Reflorestamentos de Eucalipto pontuam a região e ocupam uma grande área no distrito de Anhangüera, próximo a Cajamar. Vegetação herbácea, pequenas pastagens e culturas são verificadas em toda a área de estudo, enquanto nas planícies aluviais são comuns a vegetação arbustiva e as hidrófitas.

3.2.2 Áreas de Uso Restrito

As áreas de uso restrito são espaços destinados por legislação à preservação e manutenção do meio ambiente (São Paulo, 1975; Brasil, 1981) e também áreas destinadas ao uso industrial (Brasil, 1980), onde se busca compatibilizar as atividades industriais com a proteção ambiental.

Conforme se observa na Figura 3.3., na área de estudo estão presentes a Área de Proteção Ambiental (APA) Várzea do Tietê, a Área de Proteção aos Mananciais (APM) destinada à preservação da qualidade da água das represas Guarapiranga e Billings (responsáveis pelo abastecimento parcial de água da Grande São Paulo), o Parque Ecológico (PECO) do Tietê, o Parque Estadual do Jaraguá, uma Área Natural Tombada (AT) e parques municipais criados pelos municípios.

Estão presentes também uma Zona Industrial (ZI) e Zonas de Uso Predominantemente Industriais (ZUPI's). As ZUPI's (Figura 3.4) são definidas em projetos de zoneamento urbano dos municípios, sendo preferencialmente destinadas à instalação de indústrias, objetivando o controle e tratamento de efluentes (Brasil, 1980).

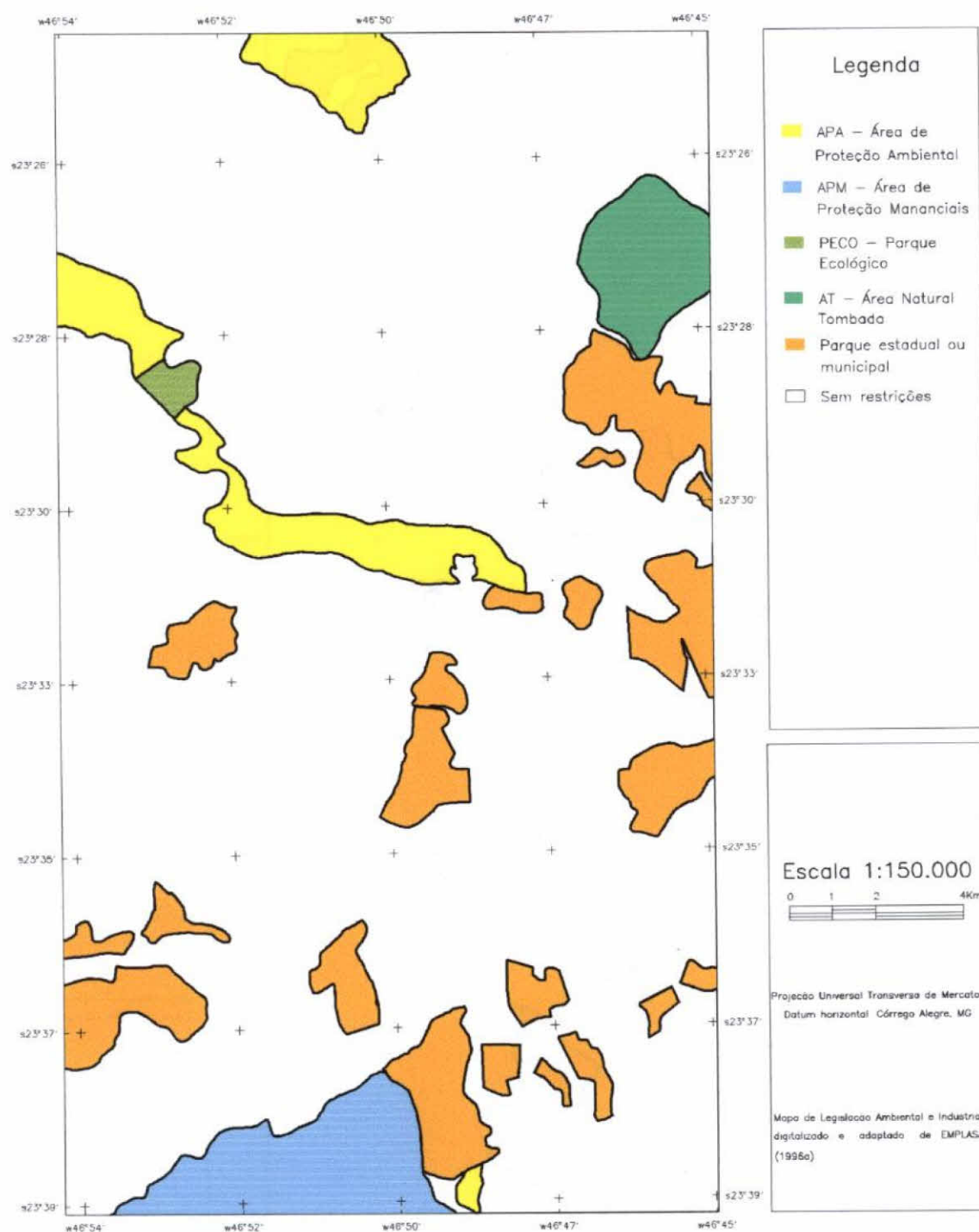


Fig. 3.3 – Áreas destinadas à preservação ambiental.

FONTE: EMPLASA (1996a).

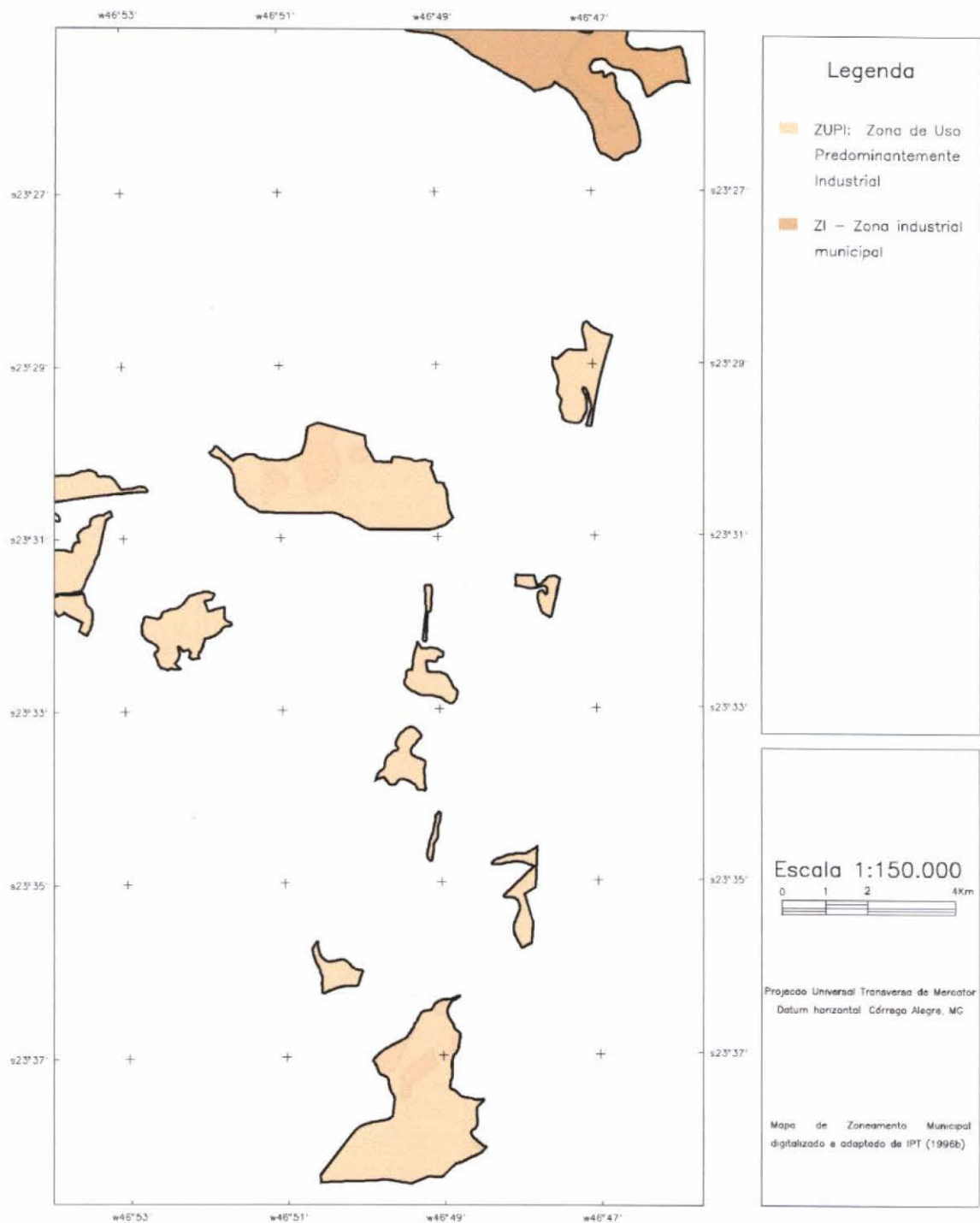


Fig. 3.4 – Zonas de Uso Preferencialmente Industrial (ZUPI's).

FONTE: EMPLASA (1996b).

3.2.3 Geologia e Geomorfologia

O estudo da geologia e da geomorfologia regionais permite identificar áreas onde a implantação da rodovia exige obras de engenharia complexas, envolvendo trocas de solo, drenagem e de estabilização de taludes⁷.

De acordo com Vetec Engenharia e Vence Engenharia (1992) e IPT (1991), a área de estudo está situada no domínio do Complexo Cristalino, apresentando manchas de sedimentos da Bacia Terciária de São Paulo e de rochas calcáreas, conforme pode ser observado na Figura 3.5.

O Complexo Cristalino é formado essencialmente de rochas magmáticas (rochas granitóides, situadas no centro da área de estudo), metamórficas (quartzito, xisto, fílitto e anfibolito, predominando na porção norte, mas também presente na porção sul da região) e rochas mistas entre magmáticas e metamórficas (migmatitos, que ocupam o sul da região e não se constituem em barreiras estruturais ao desenvolvimento do traçado).

As rochas granitóides, cujo perfil de intemperização genérico é apresentado na Figura 3.6a, são rochas granítico-gnáissicas com solo de alteração (solo residual) areno-argiloso com espessura de aproximadamente dois metros em relevo pouco colinoso, podendo-se ausentar nas encostas de maior declividade. É comum a presença de grandes matacões⁸ imersos no solo saprolítico ou em superfície e de corpos de tálus⁹, desde o sopé até as partes médias das vertentes. Esta unidade não é problemática ao traçado rodoviário.

⁷ Obras de engenharia para estabilização de taludes podem ser encontradas em IPT (1991).

⁸ Matacão é um bloco de rocha comumente arredondado, transportado ou formado "in situ", de diâmetro superior a 25 cm. É encontrado na superfície ou no interior do solo, sendo característico da alteração de rochas graníticas (IPT, 1991).

⁹ Os Corpos de Tálus são constituídos por uma grande heterogeneidade de materiais, freqüentemente apresentam elevada porosidade e são geralmente muito instáveis frente a modificações na sua geometria, quando submetidos a cortes ou aterros (IPT, 1991).

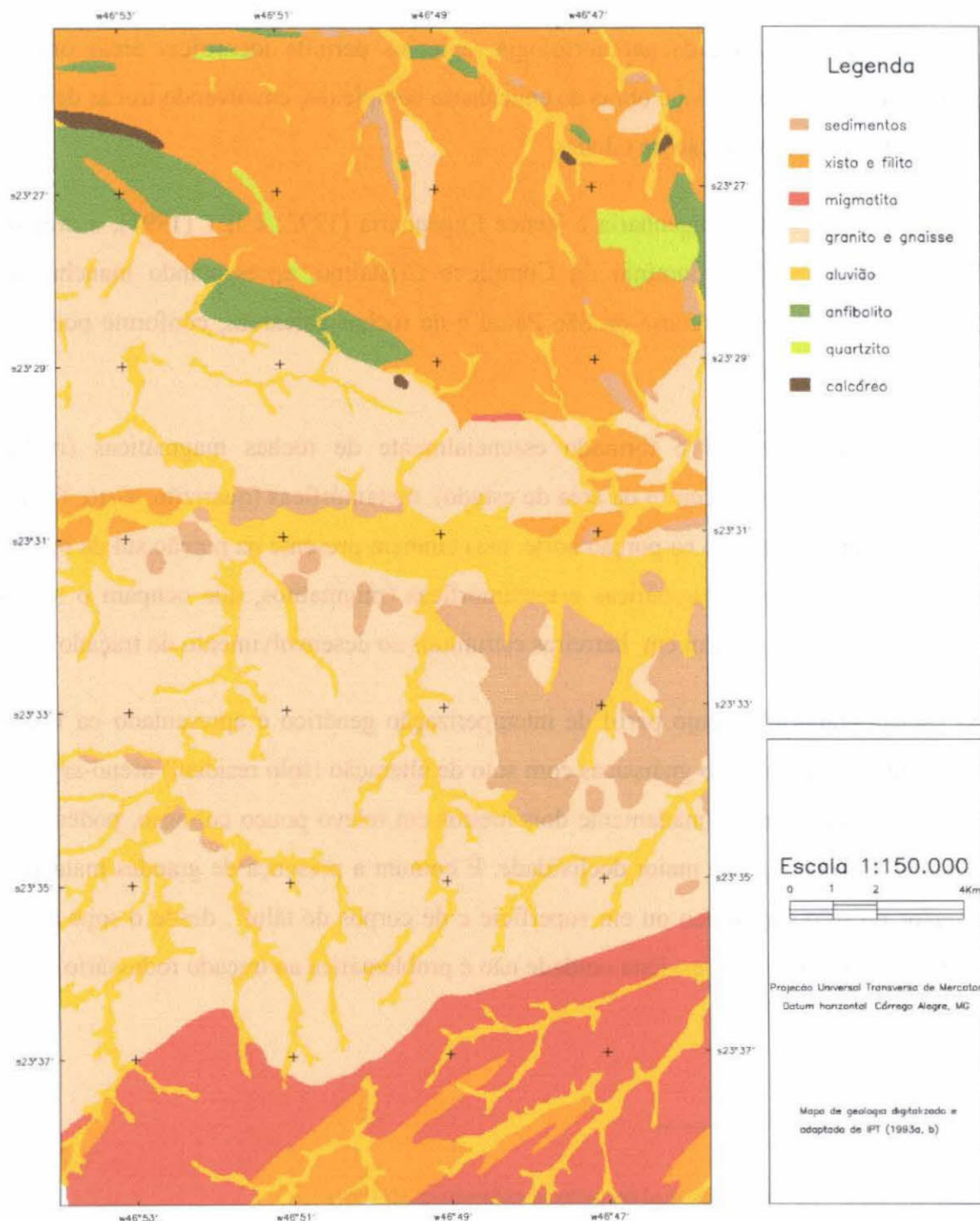


Fig. 3.5 - Distribuição das unidades litológicas na área de estudo.

FONTE: adaptada de IPT (1993a, b).

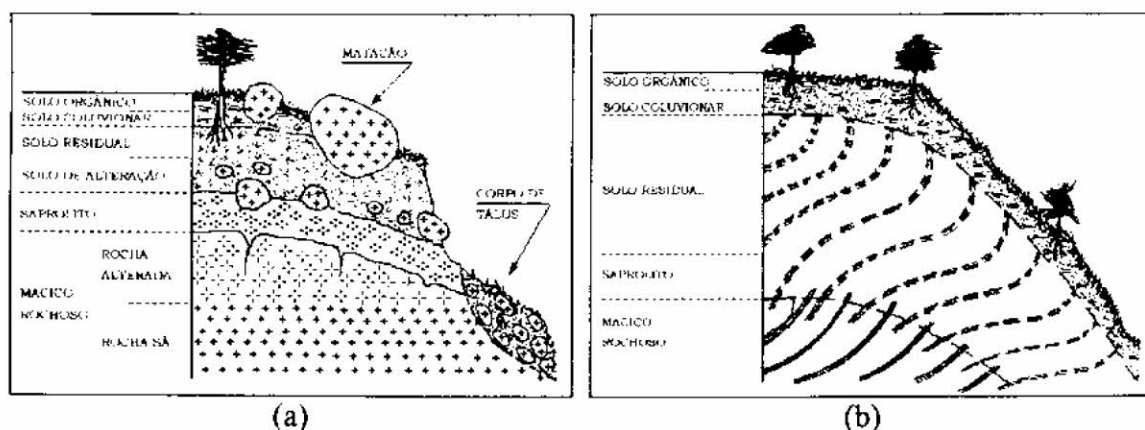


Fig. 3.6 - Perfis genéricos do Complexo Cristalino, que predomina na área de estudo e consiste de rochas granitóides (a) e rochas com estruturas xistosas (b).

FONTE: modificada de IPT (1991, p. 52 e 54).

As rochas metamórficas (Figura 3.6b) apresentam estrutura xistosa, ou seja, seus componentes minerais apresentam orientação mais ou menos paralela, definindo um plano de descontinuidade que facilita a divisibilidade ou foliação da rocha. Seu perfil de intemperismo apresenta solo residual siltoso a silto-arenoso com grandes espessuras. No domínio de filitos, esta foliação pode apresentar problemas graves de instabilidade no corte quando associada ao relevo de morros baixos.

Aluviões cobrem as partes mais baixas dos vales existentes nas áreas de relevo mais acidentado e ocupam espaços mais amplos nos setores de relevo mais suave. Foram formados por processos de construção fluvial em que o rio Tietê e seus tributários depositaram argilas e areias orgânicas ao longo de suas planícies de inundação.

As unidades geomorfológicas que constituem a área de estudo são ilustradas na Figura 3.7 e descritas em seguida:

- ✧ na unidade de *colinas*, as amplitudes altimétricas situam-se em torno de 40 m e as declividades mais comuns em 20%. O solo superficial é espesso e bastante apropriado para os serviços de terraplenagem;
- ✧ os *morrotes*, com amplitudes em torno de 60 m e declividades de 20%, podem apresentar problemas de estabilidade de taludes em trechos localizados;

- ✧ na unidade *morros baixos* predominam amplitudes de 100 m e declividades de 30%. Quando associada ao domínio geológico de filitos, torna-se problemática à implantação viária, porque a foliação da rocha ou do solo de alteração apresentam orientação desfavorável à estabilidade de cortes nas vertentes;
- ✧ os *morrotes baixos* ocorrem isolados, em meio às planícies aluviais, com amplitudes de 80 m e declividades maiores que 30%. Dificulta a implantação de rodovias porque as encostas são potencialmente instáveis e suscetíveis às interferências;
- ✧ os *morros altos* apresentam amplitudes de 150 m e declividades maiores que 30%, com anfiteatros¹⁰, vertentes de vales fortemente encaixados e segmentos de encostas com alta declividade, ocorrendo matacões no domínio de granitos;
- ✧ as *serras e escarpas* apresentam amplitudes de até 300 m e declividades maiores que 30%, sendo muito sensível a qualquer tipo de interferência;
- ✧ as *planícies aluviais* apresentam declividades inferiores a 5% e correspondem ao domínio dos aluviões. Nestas áreas são esperados os seguintes problemas: enchentes, nível de água próximo à superfície do terreno, dificuldade na drenagem e escoamento das águas servidas e pluviais, assoreamento das várzeas, estabilidade precária das paredes de escavação, solapamento das margens dos cursos de água e recalque das fundações. Quando dentro da mancha urbana, as planícies aluviais geralmente são últimas áreas a serem ocupadas (Foresti, 1986), o que torna esta unidade preferencial à passagem da rodovia, por apresentar um ‘corredor’ livre do alto custo imposto pela necessidade de desapropriações.

¹⁰ Anfiteatro é uma forma de relevo definida por processos erosivos no sopé ou ao longo das encostas naturais (IPT, 1991).

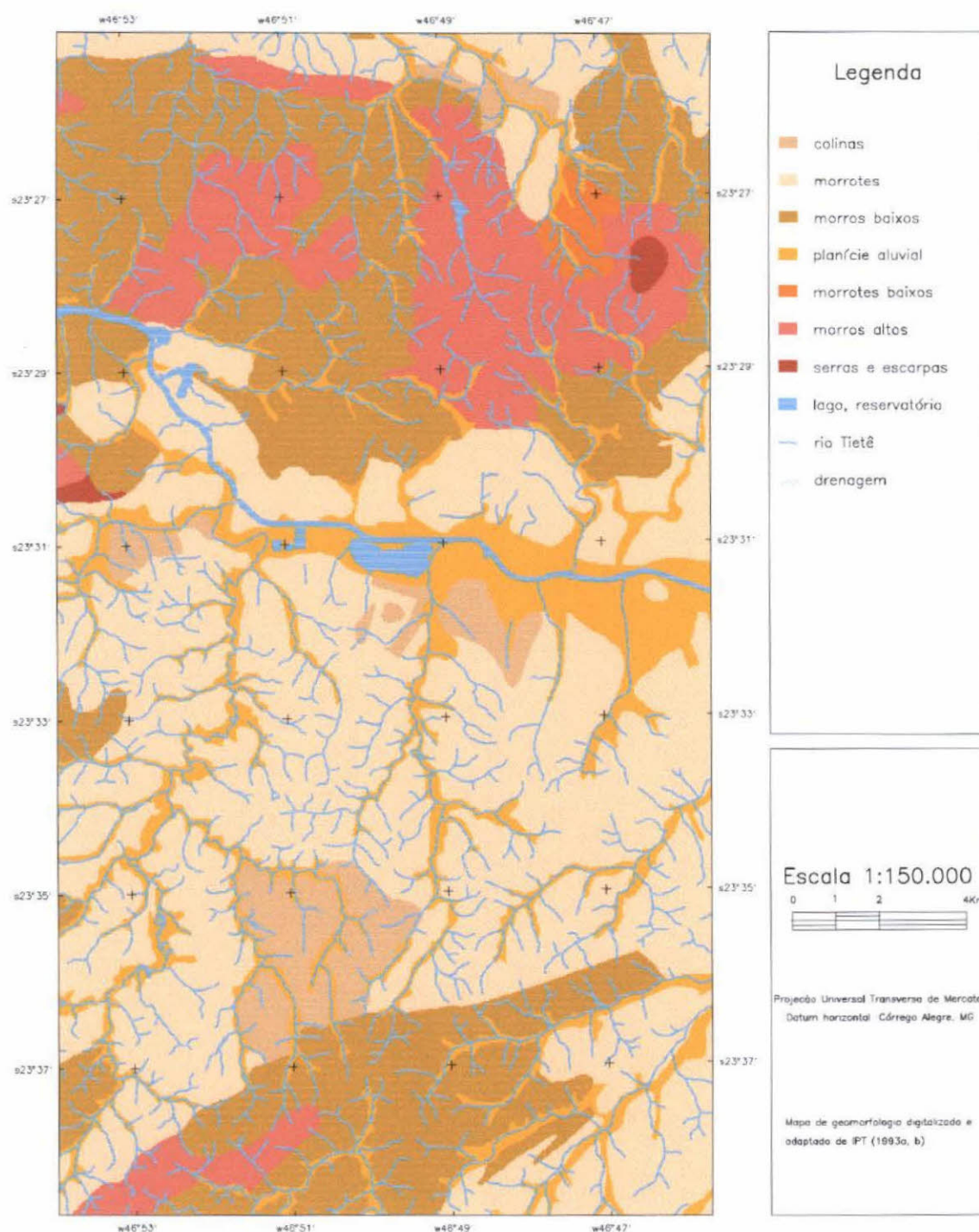


Fig. 3.7 – Distribuição das unidades geomorfológicas na área de estudo.

FONTE: adaptada de IPT (1993a, b).

CAPÍTULO 4

MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 MATERIAIS

Para a realização do presente trabalho, foram utilizadas: imagens TM-Landsat da órbita-ponto 219/76, quadrante C, de 09 de fevereiro de 1997 em formato digital; 7 fotos aéreas na escala 1:25.000, de maio de 1997; e 172 fotografias 35 mm obtidas em sobrevôo com helicóptero. Os demais dados utilizados são apresentados na Tabela 4.1.

TABELA 4.1 – MAPAS TEMÁTICOS E DADOS DIGITAIS UTILIZADOS

Item	Tema	Formato	Fonte	Escala
1	Modelo Numérico de Terreno - MNT (altimetria)	digital	Imagem Sensoriamento Remoto	-
2	Aptidão física do solo urbano	analógico	IPT (1993a, b)	1:50.000
3	Legislação Ambiental e Industrial	analógico	EMPLASA (1996a)	1:50.000
4	Legislação de Zoneamento Municipal	analógico	EMPLASA (1996b)	1:50.000
5	Declividades	analógico	EMPLASA (1996c)	1:50.000
6	Cartas topográficas	analógico	IGGSP (1972a, b)	1:50.000
7	Estudo de variantes de traçado para o Trecho Oeste	analógico	DERSA (1992)	1:50.000

Os mapas temáticos da EMPLASA (itens 3, 4 e 5) são os mesmos utilizados pela DERSA no estudo do Trecho Oeste do Rodoanel. O mapa do IPT (item 2) foi produzido em parceria com a EMPLASA e serviu de base cartográfica para estudos desta rodovia.

A imagem e os demais dados foram manipulados e analisados no Software para Processamento de Informações Georeferenciadas (SPRING) - versão 2.0.5 (INPE, 1997a), e através de algoritmos em Linguagem Espacial para Geoprocessamento Algébrico (LEGAL)¹¹ - (INPE, 1997b), ambos desenvolvidos no INPE.

O trabalho de campo foi realizado em helicóptero cedido pela DERSA e as atividades de geoprocessamento, em Estação de trabalho Sun e Mesa digitalizadora Digigraf 1.

¹¹ Linguagem de consulta e manipulação de dados para análises espaciais, realizadas por álgebra de mapas. Maiores informações a respeito desta linguagem podem ser obtidas em INPE (1997b) e Barbosa (1997).

4.2 METODOLOGIA

A metodologia definida consistiu em produzir um mapa-síntese de aptidão física a partir de informações temáticas provenientes de diversas fontes, a fim de se avaliar alternativas de traçado definidas pela DERSA para o Rodoanel, conforme o fluxograma abaixo:

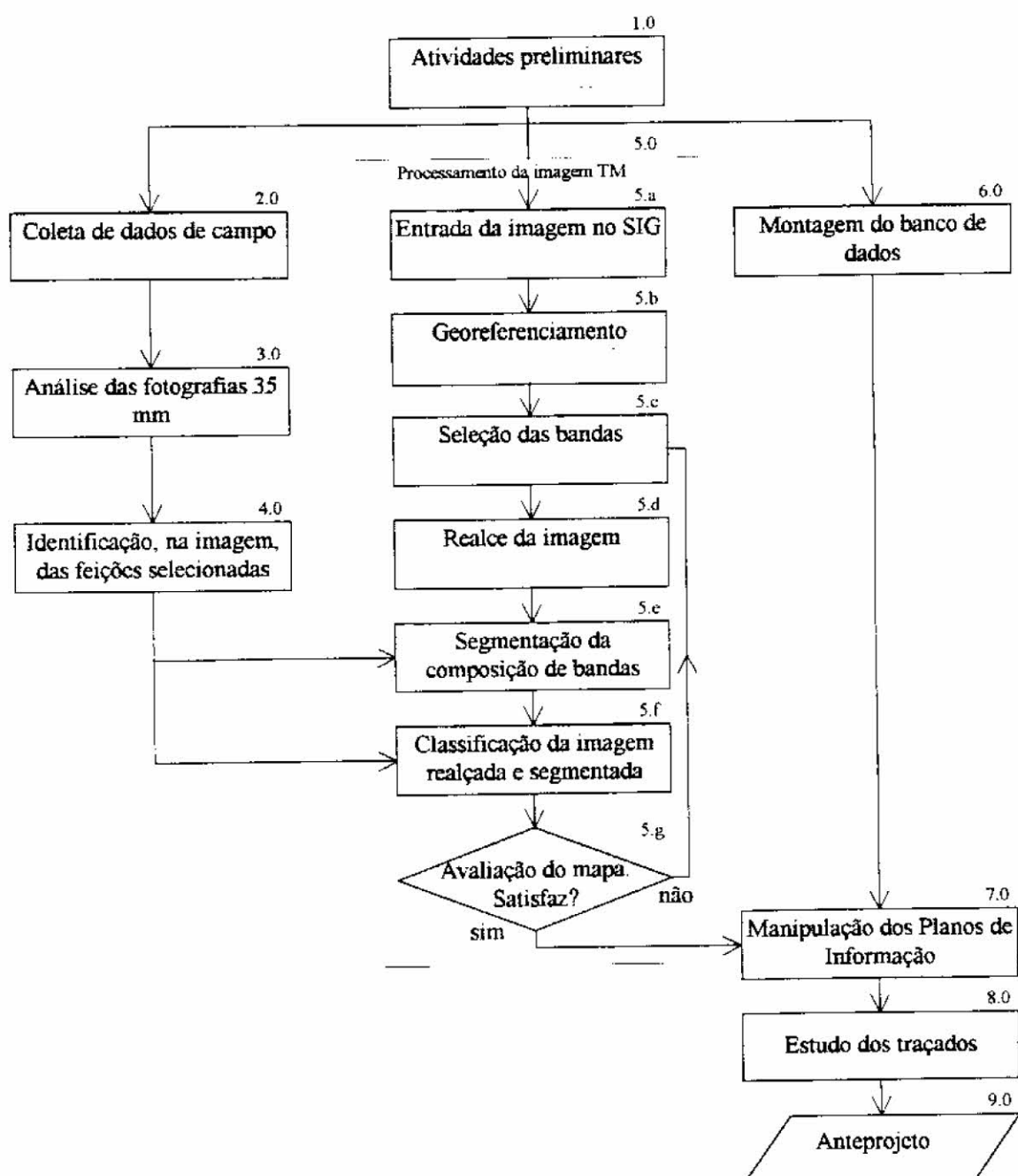


Fig. 4.1 - Fluxograma com as etapas da metodologia.

1) Atividades preliminares: os trabalhos preliminares para a elaboração do presente estudo consistiram na aquisição, junto à DERSA, de material bibliográfico e cartográfico referente à construção do Rodoanel. Paralelamente foi feito um processo de seleção e aquisição de dados de sensoriamento remoto e software para o processamento de imagens.

2) Coleta de dados de campo: em 30 de julho de 1997 foi efetuado um sobrevôo em helicóptero de propriedade da DERSA, nos locais onde estava prevista a implantação do Trecho Oeste do Rodoanel, registrando-se a verdade terrestre em fotografias 35mm.

3) Análise das fotografias 35 mm: a análise das fotografias 35 mm e das fotos aéreas em escala 1:25.000 permitiu identificar as feições de uso e cobertura da terra, obtendo-se as chaves de interpretação da imagem TM. Outras informações, tais como geomorfologia e drenagem, também poderiam ser obtidas a partir da imagem TM, caso a área de estudo não fosse urbanizada em sua maior parte, o que dificulta a obtenção destes dados.

4) Identificação, na imagem, das feições selecionadas: na imagem TM foram localizadas as feições identificadas nas fotografias 35 mm, permitindo definir as classes componentes da legenda do mapa de uso e cobertura da terra. As diferenças verificadas entre as fotografias e a imagem (escala, ângulo de visada e resolução espacial) foram minimizadas fazendo-se uso das fotos aéreas na escala 1:25.000, facilitando a localização dos alvos na imagem.

A área de estudo foi imageada pelo sensor TM-Landsat no mês de fevereiro de 1997, aerofotografada no mês de maio e sobrevoada durante o trabalho de campo no mês de junho deste ano. Estes eventos foram realizados num período de 171 dias, garantindo uma boa associação entre as feições identificadas nos diferentes produtos.

5) Processamento da imagem: para o mapeamento de uso e cobertura da terra, foram testadas diversas técnicas de processamento de imagens, envolvendo aumento linear de contraste (Crósta, 1992), segmentação (Bins et al., 1996, Venturieri, 1996), Transformação por Principais Componentes (Crósta, 1992) e operações aritméticas, tal

como o Índice de Vegetação (Richards, 1986), sendo também testados os processos de classificação Não-Supervisionada ISOSEG (Bins et al., 1993, Venturieri, 1996) e supervisionada, por Máxima Verossimilhança (Richards, 1986, Venturieri, 1996) e distância de Bhattacharyya (Swain et al., 1971). O melhor resultado foi obtido para a sequência de atividades descrita a seguir:

- a) Entrada da imagem no SIG: a imagem TM foi adquirida em CD-ROM e importada para o SPRING através de um módulo de conversão e entrada de dados. A partir da cena inteira imageada ("full frame", medindo 185 km x 185 km), foi selecionado um retângulo contendo a área de estudo;
- b) Georeferenciamento: as cartas topográficas Itapeçerica da Serra e Santana de Parnaíba (IGGSP, 1972a, b) foram utilizadas como referência cartográfica para o georeferenciamento da imagem TM;
- c) Seleção das bandas: com base em Seevers et al. (1993), foram utilizadas as bandas TM 1, 4 e 5, TM 1, 4 e 7 e TM 3, 4 e 5 no processamento da imagem;
- d) Realce da imagem: as bandas TM 1, 3, 4, 5 e 7 foram realçadas por aumento linear de contraste para que fossem evidenciadas diferenças entre níveis digitais, associados às feições de uso e cobertura da terra;
- e) Segmentação do conjunto de bandas: os conjuntos de bandas TM 1, 4 e 7, TM 1, 4 e 5 e TM 3, 4 e 5 foram segmentados para os limiares de área 10 e de similaridade 8, fazendo com que todo segmento de imagem contivesse no mínimo 10 "pixels" (limiar de área) e apresentasse níveis digitais dentro de um intervalo de no máximo 8 unidades (limiar de similaridade). Estes limiares permitiram o melhor delineamento das feições de interesse e foram definidos após diversas tentativas de segmentação com outros valores de limiar;
- f) Classificação da imagem realçada e segmentada: no treinamento foram amostrados os segmentos mais representativos da legenda pretendida de uso e cobertura da terra, servindo de referência para a classificação supervisionada de

toda a imagem. O algoritmo de classificação comparou estas amostras com os demais segmentos da imagem, rotulando-os com o tema da amostra com a qual mais se assemelhou;

g) Avaliação do mapeamento: o mapa resultante da classificação da imagem TM foi comparado com a verdade terrestre registrada nas fotografias 35 mm e nas fotos aéreas em escala 1:25.000. O processamento de imagens foi repetido para diversas possibilidades de análise, até ser obtido um produto satisfatório.

6) Montagem do banco de dados: foi criado um banco de dados em ambiente SIG para o armazenamento dos dados temáticos das imagens orbitais. O SPRING permite que cada grupo de informação seja arquivado conforme a categoria a que pertence, na forma de Planos de Informação (PI). Por exemplo, o PI de uso e cobertura da terra foi arquivado na categoria *mapa temático*.

A planimetria (hidrografia, as rodovias existentes, os limites de municípios - IGGSP, 1972a, b - e as alternativas de traçado - DERSA, 1992) e os mapas de geomorfologia (IPT, 1993a, b), geologia (IPT, 1993a, b) e áreas de uso restrito (EMPLASA, 1996a, b) foram inseridos no banco de dados do SPRING por meio de mesa digitalizadora e editados de modo a que apresentassem apenas as informações úteis a este trabalho.

As informações de MNT foram adquiridas em formato digital e inseridas no sistema através de algoritmo de importação de dados. O mapa de uso e cobertura da terra foi obtido por processamento digital de imagens, conforme apresentado na etapa anterior.

7) Manipulação dos Planos de Informação: a manipulação dos PI's foi realizada conforme mostra a Figura 4.2. A maior parte das atividades de integração de dados foi implementada no SPRING através de algoritmos em linguagem LEGAL.

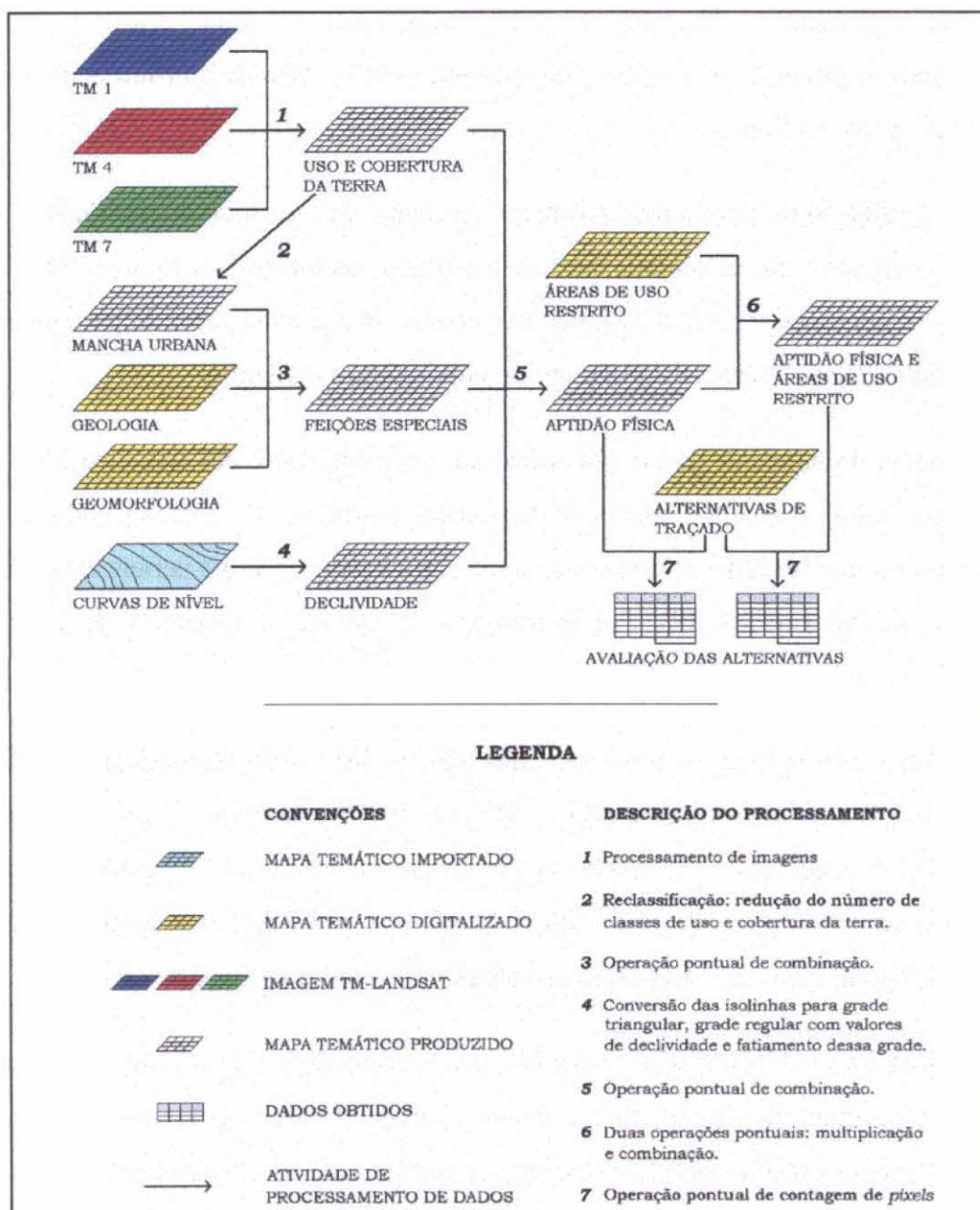


Fig. 4.2 - Esquema de manipulação dos Planos de Informação para obtenção do mapa de aptidão física da região à implantação de uma rodovia.

Como se observa na Figura acima, o banco de dados foi manipulado da seguinte forma:

- ♦ o mapa de declividades foi obtido após três processamentos (Figura 4.3) realizados a partir do MNT, que foi doado a este trabalho pela empresa Imagem Sensoriamento Remoto. Inserido no SPRING, o MNT (a) foi convertido em grade

triangular (b), que por sua vez foi convertida numa grade regular contendo os valores de declividades calculados (c). Finalmente, esta grade regular foi convertida no mapa temático de declividades (d), através de uma operação de fatiamento.

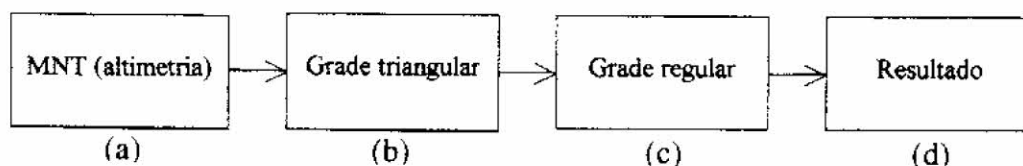


Fig. 4.3 - Etapas necessárias para a obtenção do mapa de declividades.

- ✧ o mapa de mancha urbana foi obtido por operação de reclassificação e edição do mapa de uso e cobertura da terra (obtido por processamento digital de imagens, conforme descrito na sexta etapa);
- ✧ um mapa apresentando as feições de interesse ao planejamento rodoviário, denominado *mapa de feições especiais*, foi obtido pela integração dos PT's de geologia, geomorfologia e mancha urbana, para que fossem identificadas áreas relevantes ao projeto, que são as planícies aluviais situadas fora da mancha urbana e as unidades de morros baixos associadas ao domínio geológico de filitos;
- ✧ os mapas temáticos de declividade, feições especiais, de uso e cobertura da terra e de áreas de uso restrito foram integrados para se obter os mapas-síntese de aptidão física, a partir dos quais foram avaliadas as alternativas de traçado.

Os mapas básicos foram analisados junto a uma equipe formada por especialistas da DERSA e da EMPLASA. Cada classe temática (14 classes do mapa de uso e cobertura da terra, 9 classes do mapa de feições especiais, 4 classes de declividade e 7 áreas de uso restrito, num total de 36 classes) foi avaliada, atribuindo-se notas e conceitos relativos à sua aptidão física para a implantação de uma rodovia e quanto à necessidade de se evitar as áreas destinadas à preservação ambiental. Este procedimento norteou a integração dos mapas básicos, que foi realizada através de (a) expressão matemática e (b) associações lógicas, conforme descrito a seguir:

a) integração por expressão matemática: com base em Barbosa (1997) e Sharada et al. (1997), os mapas básicos foram convertidos em grades regulares contendo as notas que foram atribuídas a cada classe temática. Estas grades foram integradas por operação algébrica pontual de multiplicação, gerando a grade regular da qual se obteve o mapa-síntese de aptidão física, por fatiamento;

b) integração por associações lógicas: foram realizadas todas as combinações possíveis entre as classes temáticas dos mapas básicos, obtendo-se o mesmo mapa-síntese obtido pelo processo de expressão matemática. Também por meio de associações lógicas, este mapa-síntese foi integrado com os PI's da área de uso restrito.

8) Estudo dos traçados: sobre o mapa-síntese foram quantificadas as extensões das classes de aptidão física interceptadas pelas alternativas de traçado, através de um procedimento automático de contagem de "pixels". Para tanto, foi necessário corrigir distorções nos traçados, devidas ao processo manual de digitalização, e convertê-lo de geo-objeto para geo-campo, obtendo-se um produto em formato matricial. A contagem de "pixels" dos traçados foi realizada identificando-se a classe temática de aptidão física correspondente a cada "pixel" de traçado. Os resultados foram obtidos em "pixels" e multiplicados por 30 metros, que é a resolução espacial dos dados digitais utilizados neste trabalho, fornecendo valores em quilômetros.

Finalmente, as alternativas Interna e Intermediária foram comparadas em termos do montante de áreas críticas interceptadas, encontrando-se a melhor alternativa para a implantação do Rodoanel.

CAPÍTULO 5

RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 MAPEAMENTO DO USO E COBERTURA DA TERRA

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos no mapeamento do uso e cobertura da terra, conforme a sequência: análise das fotografias 35mm, análise visual e processamento da imagem TM.

5.1.1 Análise visual das fotografias 35 mm

A análise das 172 fotografias 35 mm, obtidas durante o sobrevôo de helicóptero, permitiu o reconhecimento dos diferentes tipos de uso e cobertura da terra na área de estudo, a elaboração de chaves de interpretação e a avaliação das classificações realizadas. Nestas fotografias foram identificados 563 alvos, dos quais 332 tipos de uso urbano e 231 áreas cobertas por vegetação, que forneceram uma visão geral da região. A área de estudo foi caracterizada assumindo-se que estes alvos eram representativos de todas as classes de uso e cobertura da terra presentes na área de estudo.

Dos 405 Km² ocupados pela área de estudo, 237,6 Km² (58,7%) correspondem a uma mancha urbana quase contínua, que pode ser caracterizada pela variação interna de sua área quanto aos tipos de uso, pela intensa conurbação entre os municípios e pelas zonas industriais. O fenômeno da conurbação é apresentado na Figura 5.1a, onde se observa a divisa entre os municípios de Barueri e Santana de Parnaíba, ocupada por edifícios residenciais (A), habitações unifamiliares (B) e um loteamento (C), todos de alto padrão; e na Figura 5.1b, que apresenta indústrias (D) e áreas residenciais de baixo padrão (E) na divisa entre os municípios de Osasco e Carapicuíba, definida pelo ribeirão Carapicuíba. Esta Figura confirma a observação de Foresti (1986), de que as planícies aluviais, onde se encontram as várzeas dos rios, são as últimas faixas de terra ocupadas dentro da área urbana. Quanto às zonas industriais, observa-se na Figura 5.2, que as indústrias apresentam telhados em estruturas e materiais diversos (A), sendo o espaço entre elas

ocupado por estacionamentos (B), áreas de lazer (C) e áreas terraplenadas em terra nua ou gramadas, aguardando instalação industrial (D).

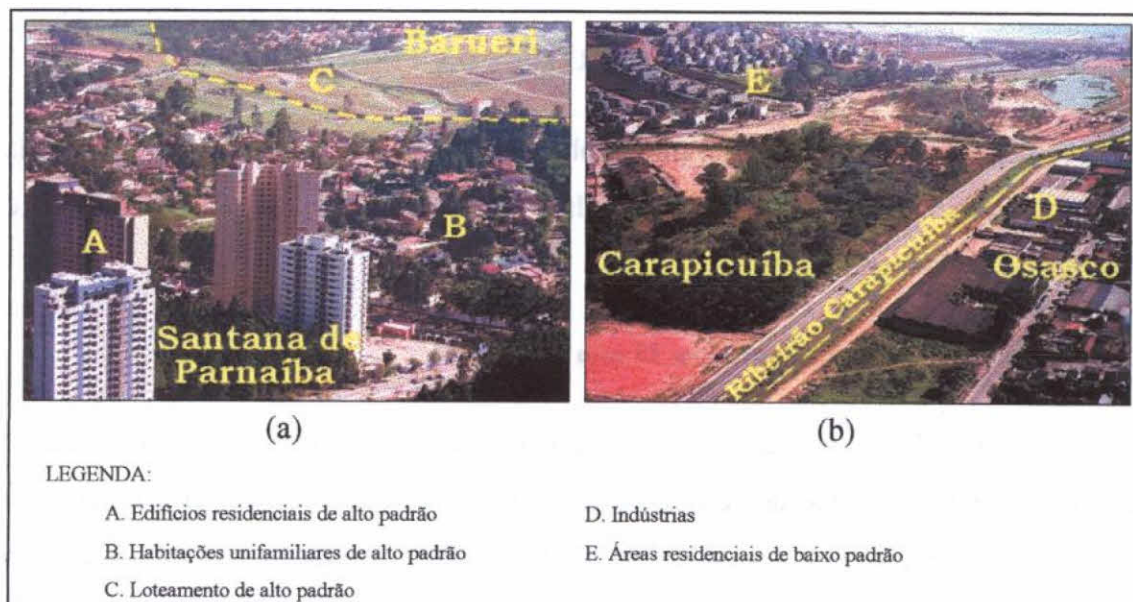


Fig. 5.1 - Variação interna da área urbana observada nas divisas entre os municípios de Barueri e Santana de Parnaíba (a) e de Osasco e Carapicuíba (b).

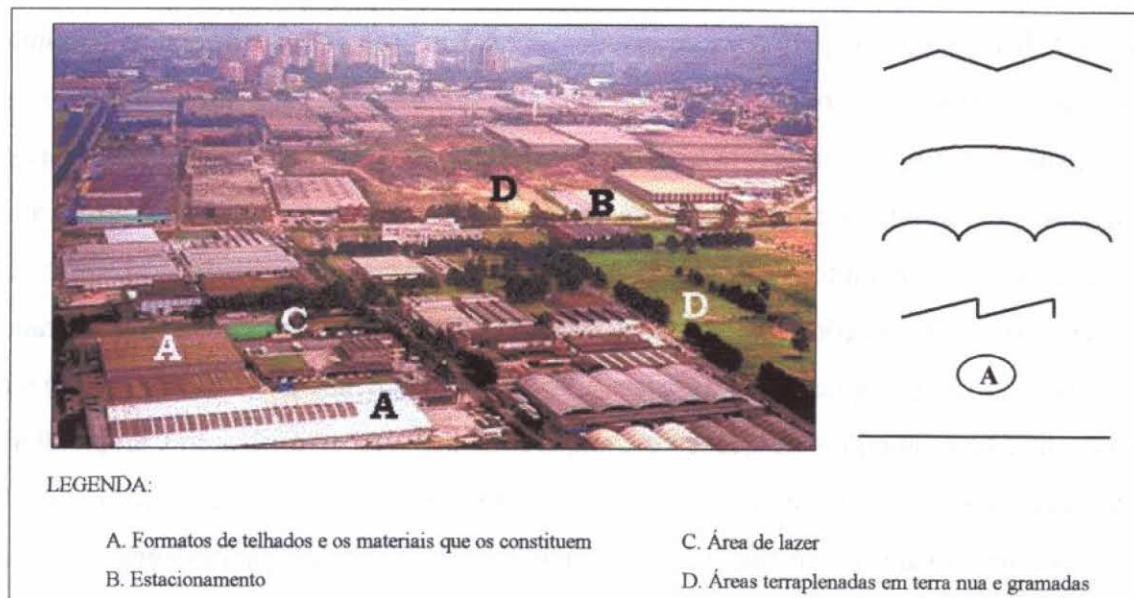


Fig. 5.2 - Zona industrial em Barueri.

O sistema de classificação do uso e cobertura da terra utilizado neste trabalho foi estabelecido com base em Pereira et al. (1988), sendo apresentado na Tabela 5.1 e discutido em seguida.

TABELA 5.1 – SISTEMA DE CLASSIFICAÇÃO DO USO E COBERTURA DA TERRA PARA A ÁREA DE ESTUDO

Classe	Descrição
Área urbanizada	Toda a área edificada da cidade.
a) Indústria	Apenas indústrias de grande porte.
b) Área construída de uso misto	Áreas residenciais, institucionais e comerciais, incluindo pequenas indústrias.
c) Áreas de ocupação rarefeita	Áreas terraplenadas onde apenas alguns lotes encontram-se ocupados.
d) Áreas desocupadas	Áreas terraplenadas não construídas.
e) Áreas pavimentadas	Áreas pavimentadas em concreto ou asfalto.
f) Usos diversos	Áreas que não se enquadram nos demais usos urbanos.
Vegetação	Toda vegetação localizada dentro e fora da área urbana.
g) Mata	Vegetação arbórea originalmente dominante, representada por formas secundárias regeneradas de vegetação natural.
h) Mata alterada	Vegetação arbórea em vários estágios de desenvolvimento, degradada por processos antrópicos diversos.
i) Reflorestamento	Formações arbóreas homogêneas instaladas pelo homem para fins industriais ou outros consumos menores.
j) Campo	Vegetação de porte herbáceo, de crescimento natural ou plantada pelo homem (culturas, pastagens e gramados), com ou sem adensamento ocasional de espécies arbustivas. Vegetação hidrófita.
k) Corpos d'água	Rios, lagos e reservatórios.

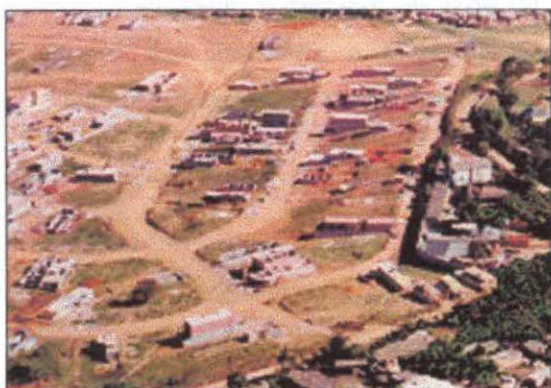
FONTE: modificada de Pereira et al. (1988).

Nas imagens TM, os diversos tipos de uso urbano foram distinguidos de diferentes maneiras: o uso industrial, pela forma dos prédios; as áreas residenciais, institucionais e comerciais (indistintas entre si), por apresentarem proporções entre área construída, vegetação e solo exposto; os loteamentos, por apresentar tanto solo exposto quanto

vegetação; e as áreas terraplenadas, pelo predomínio de solo exposto. Os tipos de uso assim identificados são apresentados em seguida:

a) Indústrias: no espaço ocupado por uma indústria verificou-se haver gramados, estacionamentos, quadras de esporte e áreas em terra nua, além do prédio destinado às atividades industriais, que apresenta variações em função da diversidade de formato das estruturas dos telhados e dos materiais que os constituem (telhas cerâmicas, metálicas ou de fibrocimento). Esta variedade de formas e materiais tanto auxiliou quanto dificultou na identificação e classificação das feições de indústrias na imagem TM.

b) Áreas construídas de uso misto: as áreas construídas de uso misto foram caracterizadas a partir de análises dos setores residenciais, que, de acordo com Kurkdjian (1986), apresentam diferenças em função das interações entre o espaço físico e o nível sócio-econômico da população residente. Foresti (1986) observou que esta diferenciação é evidenciada pelo padrão de ocupação e pode ser verificada já na fase de implantação do loteamento residencial (Figura 5.3): nos setores de baixo padrão procede-se a retirada total da vegetação, loteando-se a área e sendo construídas as unidades habitacionais (a), enquanto nos setores de alto padrão, a área terraplenada é recoberta com gramineas e árvores ornamentais e recebe a implantação do sistema viário, iniciando-se a construção das casas (b).



(a)



(b)

Fig. 5.3 – Implantação de loteamentos de baixo padrão em Carapicuíba (a) e de alto padrão em Santana de Parnaíba (b).

Os setores residenciais foram caracterizados de acordo com o padrão e a densidade de ocupação, a partir da observação das fotografias 35 mm. O padrão foi inicialmente conceituado em baixo, médio ou alto, conforme apresentado na Figura 5.4, sendo que o padrão médio foi posteriormente desconsiderado por apresentar semelhanças com os outros padrões.



Fig. 5.4 – Áreas residenciais de padrão baixo (a), médio (b) e alto (c).

O setor residencial de baixo padrão (Figura 5.4a) foi observado em bairros com população de baixa renda, onde as ruas são pouco arborizadas e nem sempre pavimentadas, os lotes desocupados apresentam vegetação herbácea ou terra nua e há poucas áreas públicas como praças e jardins. Em geral, as habitações são pequenas, cobertas por telhas de cerâmica ou de fibrocimento e ocupam quase todo o lote, não havendo recuos frontal ou lateral.

O setor residencial de médio padrão (Figura 5.4b) apresentou características ora semelhantes ao baixo padrão, ora ao alto padrão, não havendo alguma característica que lhe fosse peculiar, sendo classificado ora como baixo, ora como alto padrão.

No setor residencial de alto padrão (Figura 5.4c), observado em bairros de população de alta renda, as ruas são pavimentadas e arborizadas, as praças e lotes desocupados são gramados e contém árvores ornamentais. Em geral, as habitações unifamiliares são cobertas por telhas coloridas e construídas sob normas de recuos frontal e lateral, apresentando garagem, jardim e piscina.

Foi observado que há uma relação entre o padrão e a densidade de ocupação, pois no setor de alto padrão as unidades habitacionais são maiores e em geral não ocupam 80% da propriedade, conferindo menor taxa de área construída que a verificada no setor de baixo padrão. Desta forma, o padrão e a densidade de ocupação puderam ser distinguidos na imagem TM pelas diferentes proporções entre área construída e presença de vegetação.

Conforme mostra a Figura 5.5, foram definidas quatro classes de área construída de uso misto: *de alto padrão e alta densidade* (a), *de alto padrão e baixa densidade* (b), *de baixo padrão e alta densidade* (c) e *de baixo padrão e baixa densidade* (d).

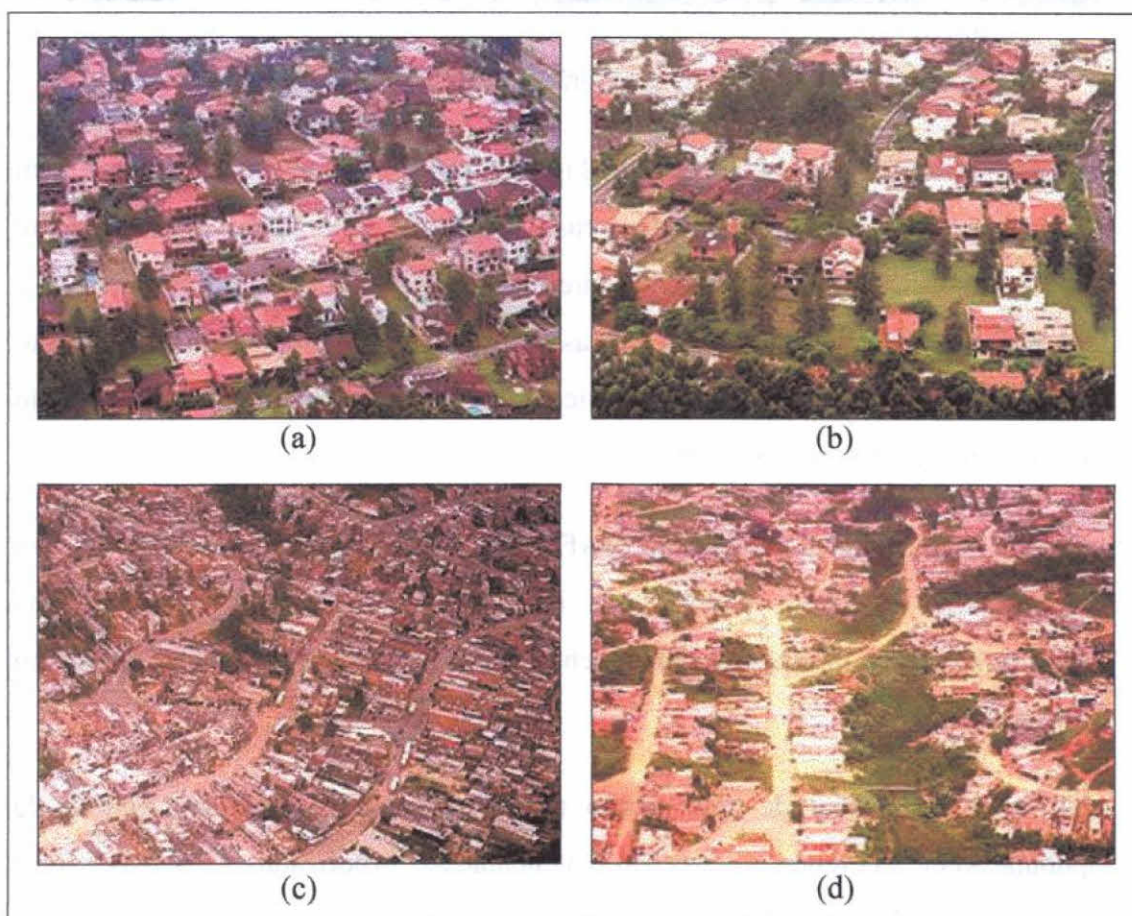


Fig. 5.5 - Relações entre padrão e densidade de ocupação.

Alguns tipos de uso não-residencial também foram associados à classe *área construída de uso misto* por serem indistintas das áreas residenciais na imagem TM. À classe *área construída de uso misto de alto padrão e baixa densidade*, foram atribuídos sítios e chácaras, clubes e grandes instituições:

- ✧ as áreas de sítios e chácaras (Figura 5.6) foram caracterizadas por uma densidade de ocupação muito baixa e pela predominância de vegetação herbácea e arbórea. Devido à baixa densidade, estas áreas nem sempre foram identificadas na imagem TM.



Fig. 5.6 - Exemplo de área ocupada por sítios e chácaras no município de Embu.

- ✧ os clubes (Figura 5.7) foram caracterizados como edificações, quadras e piscinas em meio a uma grande área coberta por gramíneas e vegetação arbórea.



Fig. 5.7 - Clube no município de Barueri.

✧ as instituições (Figura 5.8), tais como as grandes áreas institucionais religiosas, educacionais e militares, foram descritas como agrupamentos de edificações em meio a áreas gramadas e arborizadas. Quando ocupando espaços menores, estas áreas não foram identificadas na imagem.

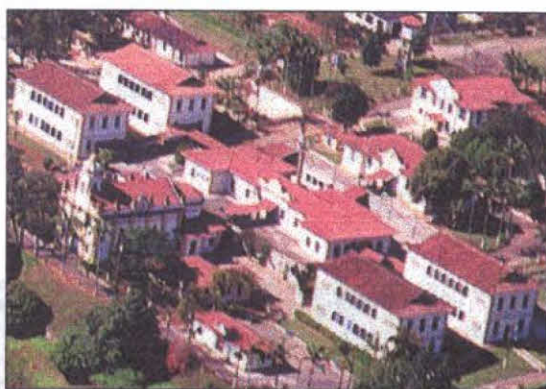


Fig. 5.8 - Instituição religiosa em Carapicuíba.

À classe *área construída de uso misto de baixo padrão e alta densidade* foram atribuídos favelas e conjuntos habitacionais:

✧ as favelas (Figura 5.9) foram caracterizadas pelo tamanho mínimo das unidades habitacionais, sem espaçamento entre si, nem organização espacial, estando também ausente a estrutura viária.



Fig. 5.9 - Favela em Osasco.

✧ os conjuntos habitacionais (Figura 5.10) apresentam alta densidade de ocupação, ruas pavimentadas e pouca arborização. As unidades habitacionais unifamiliares (a) são justapostas e cobertas predominantemente com telhas de cerâmica, enquanto o espaço entre as unidades multi-familiares verticais (b) evidencia o asfalto, o concreto, gramados, terra nua e as sombras dos prédios.



Fig. 5.10- Conjunto habitacional com unidades unifamiliares (a), em Osasco, e unidades multi-familiares verticais (b), em Carapicuíba.

c) Áreas de ocupação rarefeita: são representadas por áreas terraplenadas onde há alguma cobertura vegetal. Contrariando o que foi observado Foresti (1986), em alguns loteamentos de baixo padrão não há a retirada da vegetação (Figura 5.11), o que causa confusão entre as classes de baixo e alto padrão, nas imagens TM.

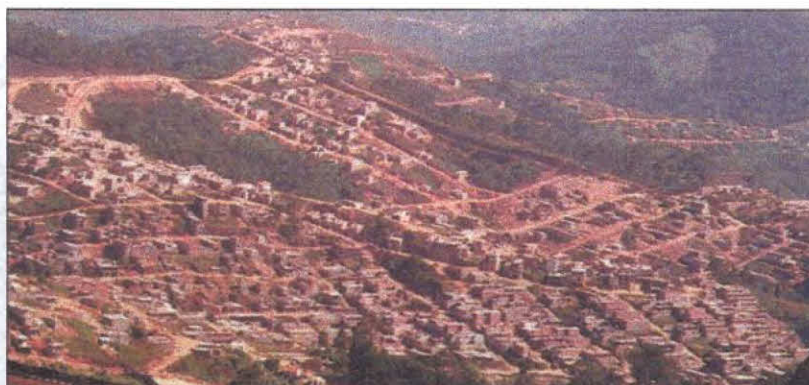


Fig. 5.11 - Loteamento de baixo padrão no distrito paulistano de Anhangüera.

d) Áreas desocupadas: a este tema foi associada toda área onde predomina o solo exposto, correspondendo a terraplenagens recentes ou abandonadas, para fins de aterro sanitário (Figura 5.12) ou empreendimento imobiliário, além de outros.



Fig. 5.12 - Aterro sanitário no distrito paulistano de Perus.

e) Áreas pavimentadas: nesta classe incluem-se as rodovias, as grandes avenidas e os estacionamentos, pavimentados em asfalto ou concreto.

f) Usos diversos: engloba os demais tipos de uso urbano, que não possuem características espectrais peculiares ou são incomuns na área de estudo.

A cobertura vegetal foi observada tanto dentro quanto fora da área urbana, é distribuída de forma descontínua e apresenta-se degradada e alterada por diversos processos antrópicos, conforme exemplificado nas Figuras 5.13a e 5.13b.



Fig. 5.13 – Plantio de Eucalipto (a) e residências (b) em áreas de floresta.

g) Mata: abrange áreas com vegetação arbórea de alta densidade (Figura 5.14), que precisam ser evitadas pelo traçado da rodovia. Na composição colorida da imagem TM, esta classe apresentou baixa tonalidade e textura grosseira e variada.

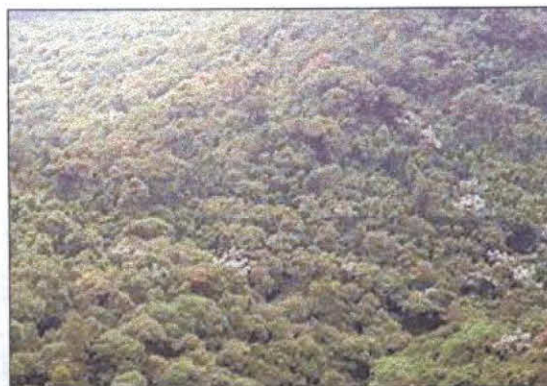


Fig. 5.14 - Floresta secundária típica.

h) Mata alterada: esta classe caracteriza-se como formação arbórea apresentando expressiva alteração antrópica (Figura 5.15). A baixa densidade de sua cobertura faz com que os elementos distribuídos na superfície sob a copa das árvores contribuam na resposta espectral do alvo, diferenciando-a da classe *mata*, no conjunto de bandas da imagem TM. Quando há solo exposto na superfície, apresenta-se na imagem com tonalidade clara e textura grosseira. Quando há vegetação de menor porte, a tonalidade é mais escura que a classe *mata*.



Fig. 5.15 - Exemplo de formação arbórea com baixa densidade de cobertura.

i) Reflorestamento: foram observados reflorestamentos de Eucaliptos (Figura 5.16) em diversas densidades e estágios de crescimento, cobrindo amplos espaços na zona rural e áreas reduzidas quando próximo ou dentro do perímetro urbano. Na composição colorida, apresenta tonalidade mais escura que a classe *mata* e textura variando entre homogênea e fina.

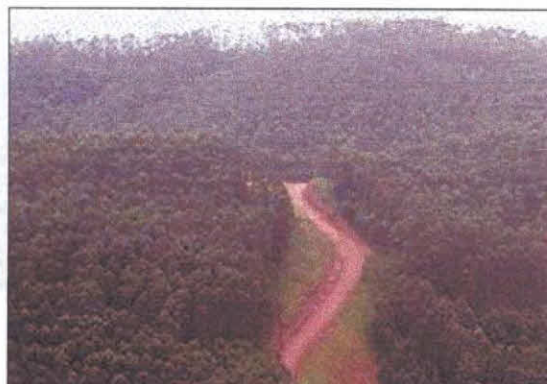


Fig. 5.16 - Reflorestamento de Eucalipto em Santana de Parnaíba.

j) Campo: as áreas de campo caracterizam-se pela vegetação de pequeno e médio porte. As herbáceas ocupam amplos espaços na zona rural e predominam nos vazios urbanos; as gramíneas estão presentes nos condomínios e loteamentos de alto padrão, em áreas institucionais e de lazer; as arbustivas e hidrófitas ocupam as várzeas do rio Tietê e afluentes; e as áreas cultivadas, pequenos espaços na área urbana ou próximo a esta. Na imagem TM estes diferentes tipos de vegetação apresentaram, em geral, tonalidades mais claras (exceto as hidrófitas, devido à presença de água) e textura homogênea.

k) Corpos d'água: os corpos d'água identificados na imagem TM referem-se aos reservatórios, lagos e o rio Tietê, que atravessa a área de estudo no sentido leste-oeste. Os leitos dos afluentes deste rio só puderam ser observados em suas respectivas embocaduras, onde suas seções são mais largas. Os corpos d'água apresentaram diversas tonalidades na imagem TM 1, em função de seus diferentes níveis de poluição.

5.1.2 Análise visual da imagem TM

A análise visual da imagem TM permitiu que, uma vez identificado um alvo na imagem, outros alvos semelhantes fossem identificados em outros setores dessa imagem. Os critérios utilizados para este fim são descritos abaixo:

- ✧ tamanho e forma: auxiliaram na identificação de alvos, tais como corpos d'água, vazios urbanos, áreas residenciais e terraplenadas, rodovias e grandes indústrias, além de outros. Alvos de pequenas dimensões, tais como agrupamentos de habitações, não puderam ser identificados;
- ✧ tonalidade e cor: auxiliaram no reconhecimento de diferenças de padrão e densidade das áreas residenciais, bem como na análise das diferentes respostas de reflectância das indústrias;
- ✧ textura: foi de grande utilidade na identificação e diferenciação das áreas residenciais, bem como na identificação de áreas reflorestadas de Eucalipto;
- ✧ localização e relação de aspectos: foram utilizados para a identificação, na imagem, de toda feição selecionada nas fotografias 35 mm.

A identificação dos alvos na imagem TM foi dificultada em áreas de relevo montanhoso, onde ocorreram variações espectrais devidas às áreas sombreadas ou mais iluminadas. Também foram de difícil localização os alvos de pequenas dimensões ou vizinhos a áreas com mesma tonalidade, cor ou textura, como ocorreu com indústrias instaladas em áreas de solo exposto.

A Figura 5.17 exemplifica como a imagem TM pode ser comparada com fotos aéreas na escala 1:25.000, por análise visual. É apresentada uma zona industrial de Barueri, na banda TM 7 contrastada e na foto aérea, contendo uma área residencial de alto padrão (A), indústrias (B), terra nua (C), a Rodovia Castello Branco (D), o Rio Tietê (E), reservatórios de tratamento de efluentes (F) e área residencial de baixo padrão (G).

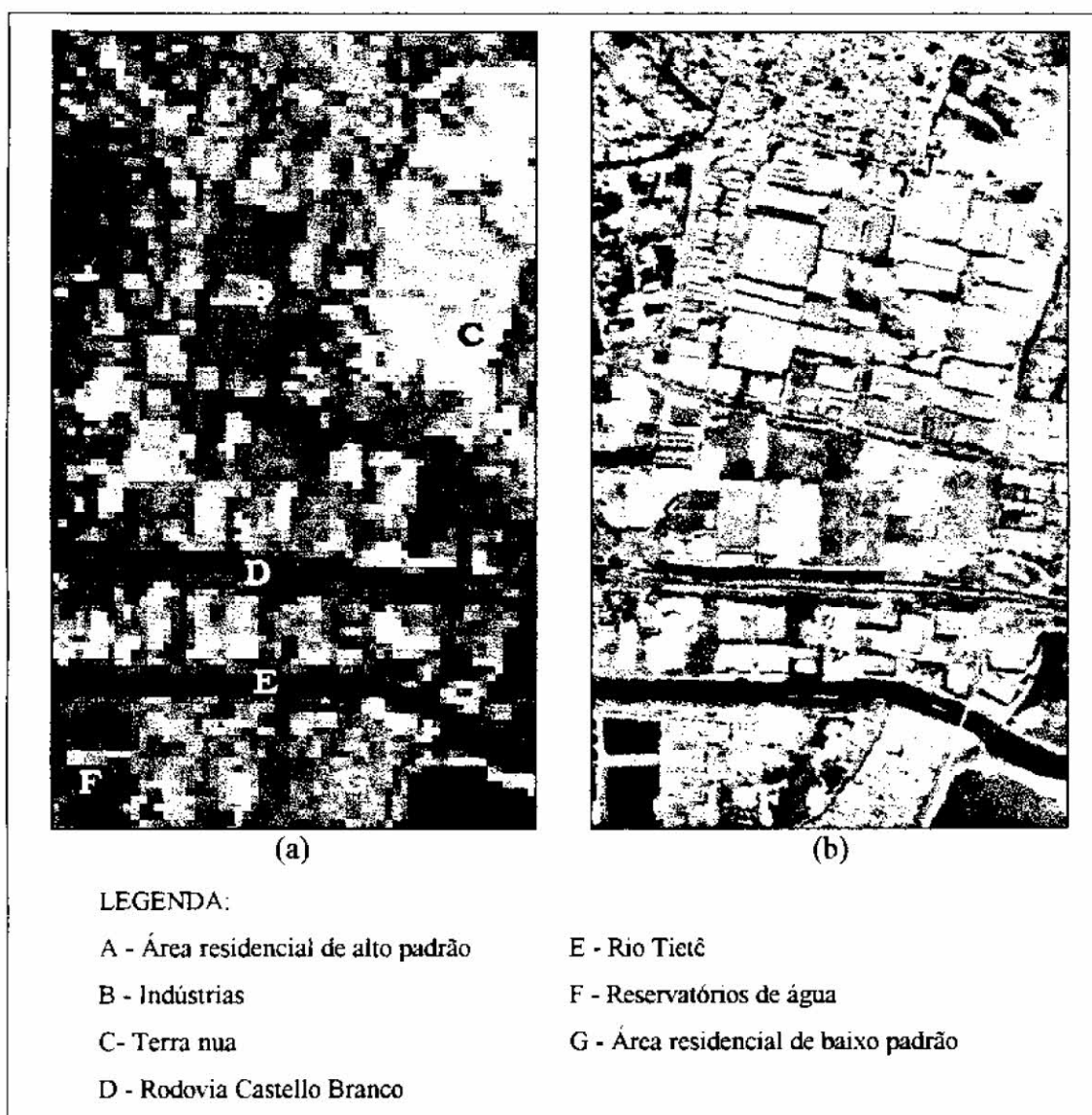


Fig. 5.17 - Comparação entre a banda TM 7 (a) e uma foto aérea vertical (b), sem escala.

5.1.3 Processamento de Imagens

Foram testados processamentos envolvendo Transformação por Componentes Principais e operações aritméticas, dentre as quais o Índice de Vegetação, mas não apresentaram resultados satisfatórios, quando classificados em processos supervisionados e Não-Supervisionados. A dificuldade em se obter resultados satisfatórios por estes processamentos resultou de que estes descaracterizaram o comportamento radiométrico do alvo, dificultando a identificação automática dos alvos intra-urbanos. Os melhores

resultados de mapeamento do uso e cobertura da terra foram obtidos pela classificação supervisionada da imagem TM contrastada e segmentada, conforme são discutidos a seguir:

a) Georeferenciamento: foi a única atividade de pré-processamento realizada, já que a correção atmosférica seria necessária apenas caso o presente trabalho contemplasse estudos de comportamento espectral ou que envolvessem imagens multi-temporais.

O registro efetuado apresentou um erro médio de 11,72 metros (“sub-pixel”), considerado aceitável para a escala 1:50.000 das cartas utilizadas (Brasil, 1986, citado por Vergara, 1994).

b) Bandas TM selecionadas: foi realizado o mapeamento do uso e cobertura da terra para os conjuntos de bandas TM 1, 4 e 5, TM 1, 4 e 7 e TM 3, 4 e 5 sugeridas por Scevers et al. (1993), sendo obtido o melhor resultado com a classificação do conjunto de bandas TM 1, 4 e 7, na qual as feições intra-urbanas foram identificadas com maior precisão. A maior dificuldade encontrada na classificação do conjunto TM 3, 4 e 5 foi a confusão entre as classes *indústria* e *área construída de uso misto de baixo padrão e alta densidade*. No conjunto TM 1, 4 e 5 foi verificada confusão na transição entre as áreas urbanas e o campo, bem como no padrão das classes de *área construída uso misto*.

c) Aumento linear de contraste: o aumento linear de contraste realçou diferenças radiométricas entre os alvos, tornando-os passíveis de identificação visual e auxiliando no processo de segmentação da imagem.

d) Segmentação do conjunto de bandas TM 1, 4 e 7: a segmentação aplicada às bandas TM 1, 4 e 7 resultou em uma imagem fragmentada, na qual cada segmento continha “pixels” com níveis de cinza semelhantes (Figura 5.18).

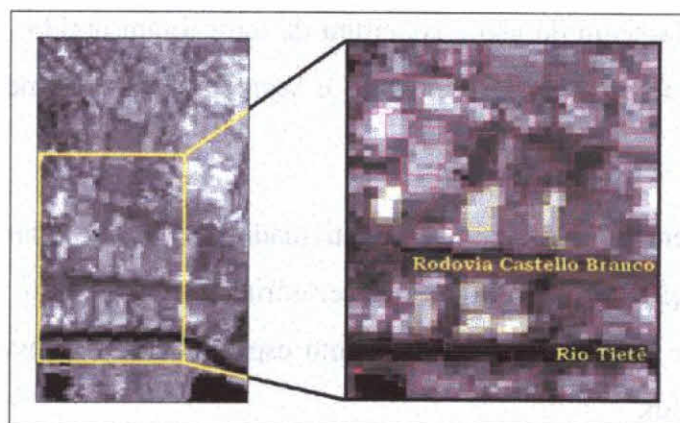


Fig. 5.18 - Setor da banda TM 7, após segmentação.

A importância da segmentação de imagens está em que os segmentos delineados contém “pixels” com níveis digitais similares, provavelmente associados a um só alvo, o que seria ideal para o processo de classificação da imagem. Mas isto nem sempre ocorre, devido aos seguintes fatores:

- ✧ alguns alvos foram fragmentados em dois ou mais segmentos, por conterem níveis digitais num intervalo maior que o limiar de similaridade (de oito níveis digitais). Por exemplo, o telhado da indústria da Figura 5.19a foi segmentado em quatro partes (Figura 5.19b), apesar de constituído por um mesmo material e de suas águas possuírem uma só orientação. Neste caso específico, estas partes foram atribuídas à classe indústria, quando do processo de classificação;

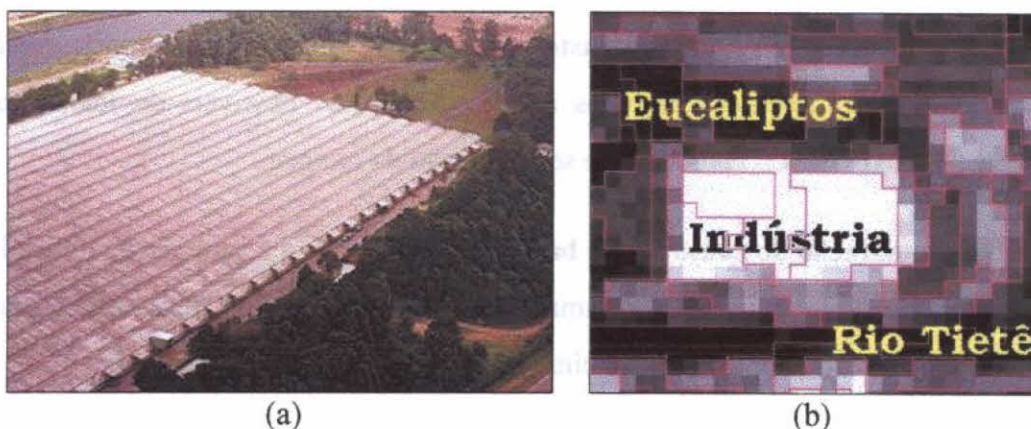


Fig. 5.19 - Segmentação de um telhado de indústria na banda TM 7.

✧ algumas feições de uso da terra não foram corretamente delineadas. Isto ocorreu porque, no momento do imageamento, a reflectância dos materiais na vizinhança do alvo predominou sobre a radiância do alvo em questão, contaminando o seu comportamento radiométrico e causando variações no nível digital de alguns “pixels” do alvo. Quando esta variação excedeu o limiar de similaridade, tais “pixels” não foram incluídos no segmento ao qual estava associado parte do alvo;

✧ alguns segmentos continham “pixels” de diferentes alvos, o que se deve a que um segmento não pode conter menos de 10 “pixels” (limiar de área), de forma que alguns “pixels” ou grupos de “pixels” foram associados ao segmento vizinho mais similar.

e) Classificação: na definição do espaço amostral de treinamento, muitos segmentos não puderam ser amostrados pelos seguintes motivos:

✧ não foram localizados com precisão na imagem, por possuírem tamanho pequeno ou se assemelharem a alvos vizinhos em termos de textura ou tonalidade (Figura 5.20);



Fig. 5.20 - Exemplo de alvo (a) localizado sem muita precisão na banda TM 7 (b).

✧ não foram convenientemente delineados e continham “pixels” de outros alvos;

❖ influenciaram a classificação de outros alvos, por conterem os mesmos materiais ou as mesmas proporções de materiais peculiares a outras classes de alvos. A Figura 5.21 exemplifica as variações que um mesmo tipo de uso pode apresentar: as populações residentes nas áreas residenciais A, B e C aparentam possuir o mesmo nível sócio econômico, mas no entanto: A apresenta uma maior diversidade de materiais de construção, em B predominam a telha cerâmica, o gramado e o asfalto, e em C predomina a arborização. Observa-se então que, embora representem a mesma classe de uso residencial, A, B e C apresentam comportamentos radiométricos diferenciados.



Fig. 5.21 - Áreas residenciais no município de Barueri.

No processo de treinamento foi definido um espaço amostral de 55 segmentos, representando quatorze classes de uso e cobertura da terra. Algumas classes precisaram ser mais amostradas que as demais, devido a variações de comportamento espectral. Por exemplo, na Figura 5.22a, observa-se a diferença de cor associada a diferentes níveis de poluição verificados em uma lagoa em Carapicuíba (1), onde é feita extração de areia, e o rio Tietê (2), onde a poluição é generalizada. Já nas Figuras 5.22b e 5.22c, observa-se indústrias com telhamento em diferentes materiais, formas e orientação das águas.

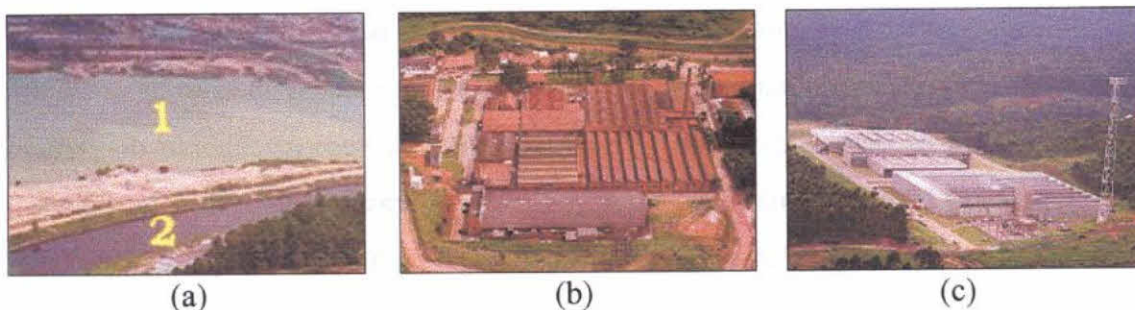


Fig. 5.22 - Exemplos de variação de aspectos entre alvos semelhantes.

Quanto aos resultados obtidos pela classificação da imagem contrastada e segmentada, foi observado que:

- ✧ foram corretamente classificados os alvos bem delineados na segmentação e cujo comportamento radiométrico é característico do uso que representam;
- ✧ foram confundidos os segmentos que continham proporções de vegetação ou solo exposto semelhantes a outros tipos de uso representados nos segmentos amostrados. Por exemplo, segmentos contendo o asfalto de uma rodovia e a vegetação lindeira foram confundidos com a classe *área construída de uso misto de alto padrão e baixa densidade*;
- ✧ não foram corretamente classificadas as sub-áreas urbanas onde o uso é homogêneo, porém composto por vários materiais. Como materiais diferentes estão associados a níveis digitais diferentes, estas áreas foram fragmentadas em diversos segmentos e atribuídas a temas diferentes. Por exemplo, as áreas verdes dos setores residenciais foram associadas a classes de vegetação ao invés de classes de área urbanizada, o que denota a necessidade de edição da imagem classificada.

5.1.4 Montagem e Manipulação do Banco de Dados

A análise dos dados temáticos realizada junto ao corpo técnico do setor de planejamento da DERSA e da EMPLASA, permitiu definir o modelo conceitual de obtenção do mapa-síntese de aptidão física, que considerou, ainda que dissociados, a fisiografia do terreno

(declividade, geologia, geomorfologia, uso e cobertura da terra) e a legislação de preservação e controle ambientais (áreas de uso restrito e zonas industriais). Foram desconsiderados os demais aspectos pertinentes à fase de reconhecimento do projeto rodoviário (tais como funcionalidade e características físicas e geométricas da rodovia), bem como diferenças entre classes temáticas similares de um mesmo mapa temático. Por exemplo, as áreas destinadas à preservação ambiental (APA, APM, PECO, AT e parques) não foram distinguidas em termos de seu potencial impactante, assim como os diferentes setores da área urbana, em termos de suas variáveis urbanísticas.

A hierarquia dos PI's e das classes temáticas foi estabelecida de acordo com os mesmos critérios utilizados pela DERSA no estudo do Trecho Oeste do Rodoanel. A estas classes foram atribuídas notas na escala de 0 e 3, diretamente relacionadas com as suas aptidões físicas ao projeto rodoviário. A essas notas foram associados os conceitos de aptidão: *imprópria* (nota 0), *desfavorável* (nota 1), *favorável* (nota 2) e *preferencial* (nota 3).

a) Mapa de Uso e Cobertura da Terra

O mapa de uso e cobertura da terra (Figura 5.23) contemplou quatorze classes, sendo nove de uso urbano, quatro de vegetação e a classe de corpos d'água, qualificadas conforme mostra a Tabela 5.2. Convém observar que classes temáticas distintas podem apresentar a mesma aptidão física à implantação do traçado rodoviário. Por exemplo, as classes *mata densa* e *áreas construídas de uso misto de alta densidade* integram a mesma classe de aptidão física *impróprio*.

O mapa de uso e cobertura da terra não foi objeto de avaliação estatística porque não haviam dados atualizados que permitissem caracterizar o ambiente físico. Por exemplo, conforme Ceccato (1994), para se avaliar o padrão de setores residenciais seria necessário conhecer as condições de infra-estrutura, os rendimentos da população residente, a ocorrência de doenças infecto-contagiosas, a criminalidade, a presença da vegetação e o espaço construído. Destas, apenas as duas últimas poderiam ser obtidas a partir das imagens TM (através de parâmetros de Índice de Vegetação e textura, respectivamente).

Das classes apresentadas na Tabela 5.2, o traçado da rodovia deve evitar: *área construída de uso misto de alto padrão e alta densidade, área construída de uso misto de baixo padrão e alta densidade, indústria, mata e corpos d'água*. O mapeamento das demais classes permitiu verificar o potencial da classificação automática do conjunto de bandas TM 1, 4 e 7, após processadas pelas técnicas de aumento linear de contraste e segmentação.

TABELA 5.2 - QUALIFICAÇÃO DO USO E COBERTURA DA TERRA

Tipo de uso e cobertura	Conceito	Nota
Indústria	imprópria	0
Área construída de uso misto de alto padrão e alta densidade	imprópria	0
Área construída de uso misto de alto padrão e baixa densidade	desfavorável	1
Área construída de uso misto de baixo padrão e alta densidade	imprópria	0
Área construída de uso misto de baixo padrão e baixa densidade	desfavorável	1
Áreas de ocupação rarefeita	favorável	2
Áreas desocupadas	preferencial	3
Áreas pavimentadas	preferencial	3
Usos diversos	favorável	2
Mata	imprópria	0
Mata alterada	preferencial	3
Reflorestamento	preferencial	3
Campo	preferencial	3
Corpos d'água	imprópria	0

Considerando-se o critério de custo, o padrão das sub-classes de *área construída de uso misto* não influenciou na pontuação atribuída, porque não ficou definido se é mais caro desapropriar o metro quadrado de alto padrão ou de baixo padrão, já que a população removida das áreas de baixo padrão precisa ser realojada para outros locais, sendo os encargos assumidos pela gerenciadora do empreendimento.

A mancha urbana (Figura 5.24) foi obtida por reclassificação e edição do mapa de uso e cobertura da terra, assumindo-se como área urbana: a terra urbana, terra construída e as áreas desocupadas dentro do espaço urbano, conforme citado em Pereira et al. (1989).

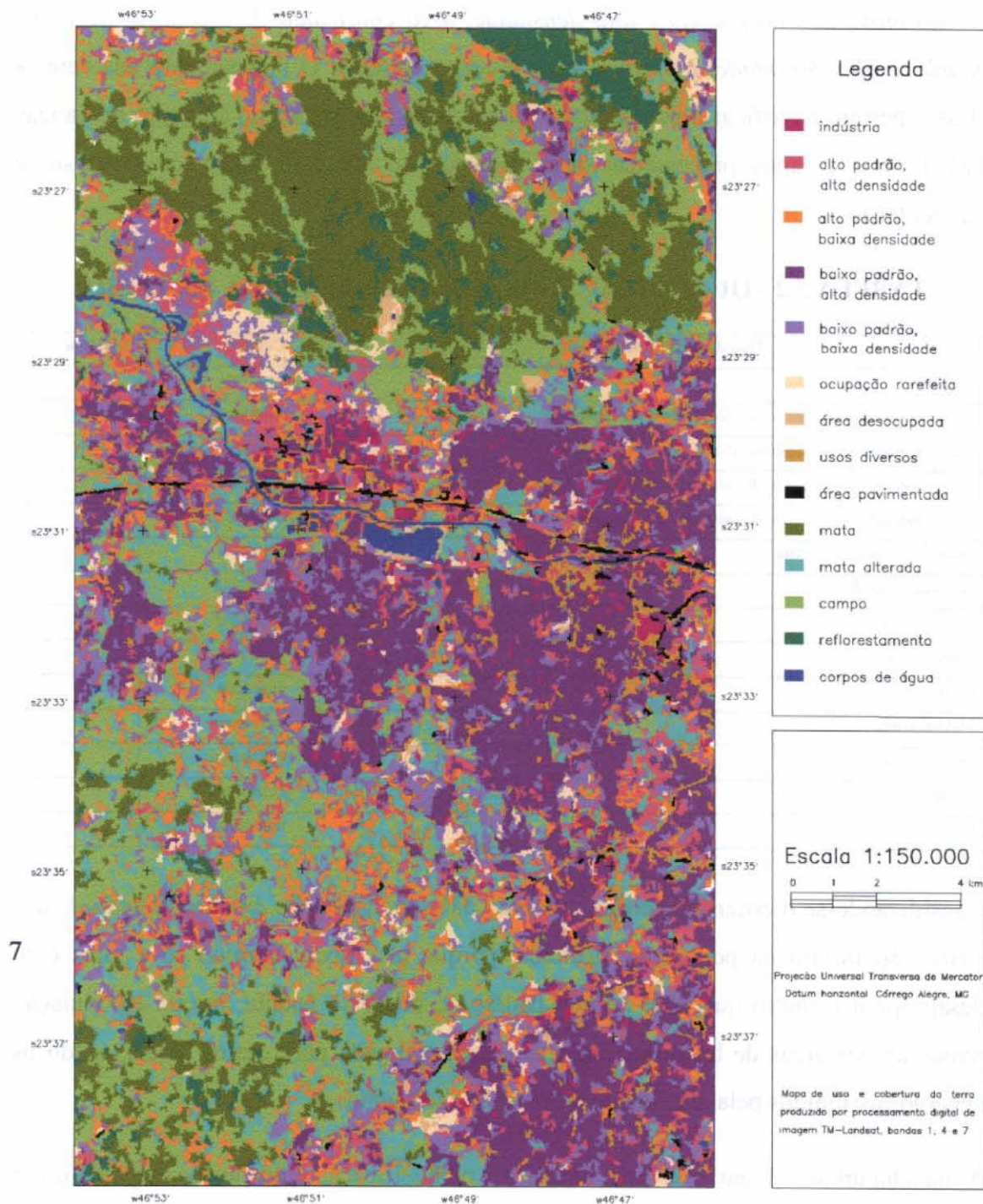


Fig. 5.23 - Mapa de uso e cobertura da terra, obtido por processamento digital da imagem TM-Landsat.



Fig. 5.24- Mancha urbana obtida por reclassificação do mapa de uso e cobertura da terra.

b) Mapa de Feições Especiais

O mapa de feições especiais (Figura 5.25) foi produzido com base na Tabela 5.3, pela integração dos mapas de geologia (Figura 3.5), geomorfologia (Figura 3.7) e mancha urbana (Figura 5.24), destacando as áreas de *morros baixos no domínio geológico de filitos* e as *planícies aluviais dentro da mancha urbana*.

De acordo com o modelo conceitual adotado neste trabalho, as planícies aluviais são discriminadas em função de sua associação com a mancha urbana pois, apesar desta unidade morfológica apresentar condições físicas desfavoráveis para a implantação de uma rodovia (ver Tabela 5.3), quando dentro da mancha urbana, estas áreas apresentam-se pouco construídas e contendo tecido urbano inconsolidado, conforme já havia sido observado por Foresti (1986) e foi apresentado na página 56 deste trabalho.

TABELA 5.3 - QUALIFICAÇÃO DAS FEIÇÕES ESPECIAIS

Classe	Amplitude	Declividade	Aptidão para o projeto rodoviário	Conceito	Nota
Planícies aluviais dentro da área urbana	≤ 5 m	≤ 5 %	áreas com condições topográficas favoráveis e livres de ocupação urbana, porém sujeitas a inundações e de solo com baixa capacidade de suporte.	preferencial	3
Colinas	40 m	10 a 20 %	o solo superficial é bastante apropriado para a construção de aterros.	preferencial	3
Morrotes	60 m	20 a 30 %	problemas localizados de estabilidade de cortes.	preferencial	3
Morros baixos	100 m	20 %	requer cuidados na execução de aterros	favorável	2
Morros baixos no domínio geológico de filitos	100 m	20 %	os cortes podem apresentar instabilidade.	desfavorável	1
Morrotes baixos	100 m	20 %	elevado escoamento de águas pluviais compromete a estabilidade de aterros e serviços de drenagem.	desfavorável	1
Morros altos	150 m	20 a 30 %	possibilidade de ocorrer deslizamentos e queda de blocos.	desfavorável	1
Planícies aluviais fora da área urbana	≤ 5 m	≤ 5 %	área com condições topográficas favoráveis, mas sujeita a inundações. Apresenta nível de água próximo à superfície, além de solo arenoso e orgânico.	imprópria	0
Serras e escarpas	100 a 300 m	≥ 30 %	estabilidade precária das encostas inviabilizam o projeto rodoviário.	imprópria	0

FONTE: modificada de IPT (1993a, b) e Vetec Engenharia (1994).

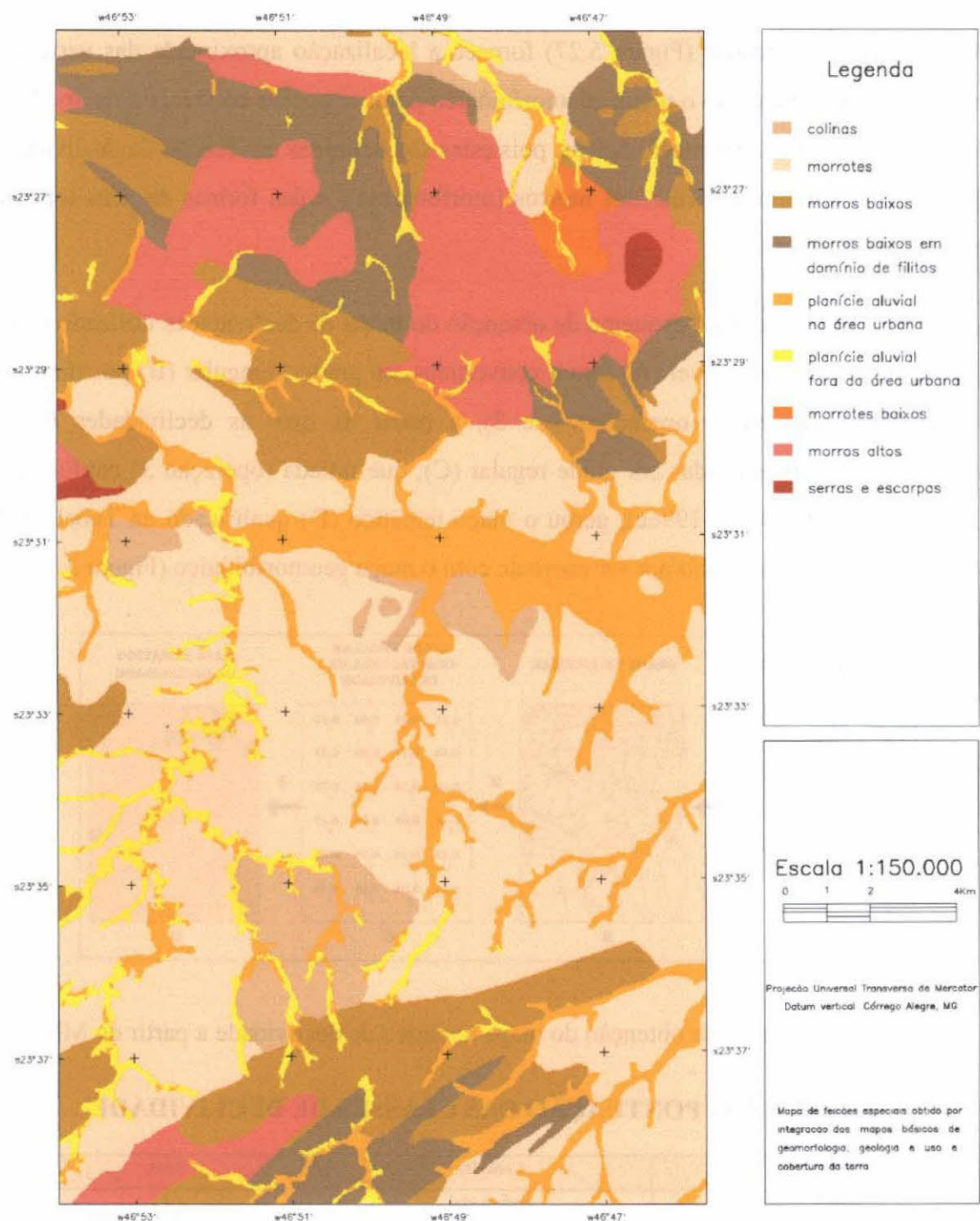


Fig. 5.25 - Mapa de feições especiais obtido pela integração dos mapas de geologia (Figura 3.5), mancha urbana (Figura 5.24) e geomorfologia (Figura 3.7).

FONTE: modificada de IPT (1993a, b).

c) Mapa de Declividades

O mapa de declividades (Figura 5.27) fornece a localização aproximada das vertentes mais íngremes, enquanto o mapa geomorfológico permite apenas conhecer a declividade dominante nas unidades morfológicas, pois estas são definidas em função da declividade média e da amplitude média dos morros (morfometria), e das formas de seus topos e vertentes (morfografia).

A Figura 5.26 apresenta o esquema de obtenção do mapa de declividades utilizado neste trabalho: as curvas de nível (A) foram convertidas em grade triangular (B) por meio de operações matemáticas (operações 1 e 2), a partir da qual as declividades foram calculadas¹² e armazenadas em grade regular (C), que fatiada (operação 3) conforme a legenda de EMPLASA (1996c), gerou o mapa temático (D) qualificado na Tabela 5.4. Este mapa não foi avaliado por ser coerente com o mapa geomorfológico (Figura 3.7).

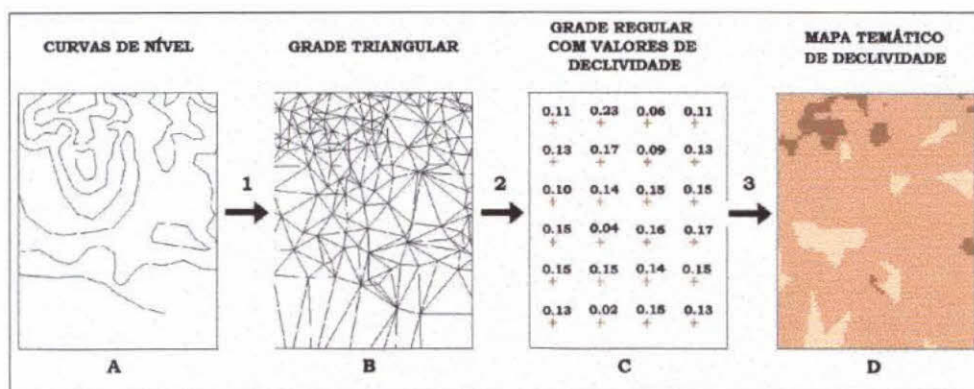


Fig. 5.26 – Esquema de obtenção do mapa temático de declividade a partir do MNT.

TABELA 5.4 - PONTUAÇÃO DAS CLASSES DE DECLIVIDADE

Declividade	Conceito	Nota
Abaixo de 5%	preferencial	3
De 5 a 20%	favorável	2
De 20 a 40%	desfavorável	1
Acima de 40%	imprópria	0

¹² A declividade do terreno também pode ser obtida conforme De Biasi (1992).

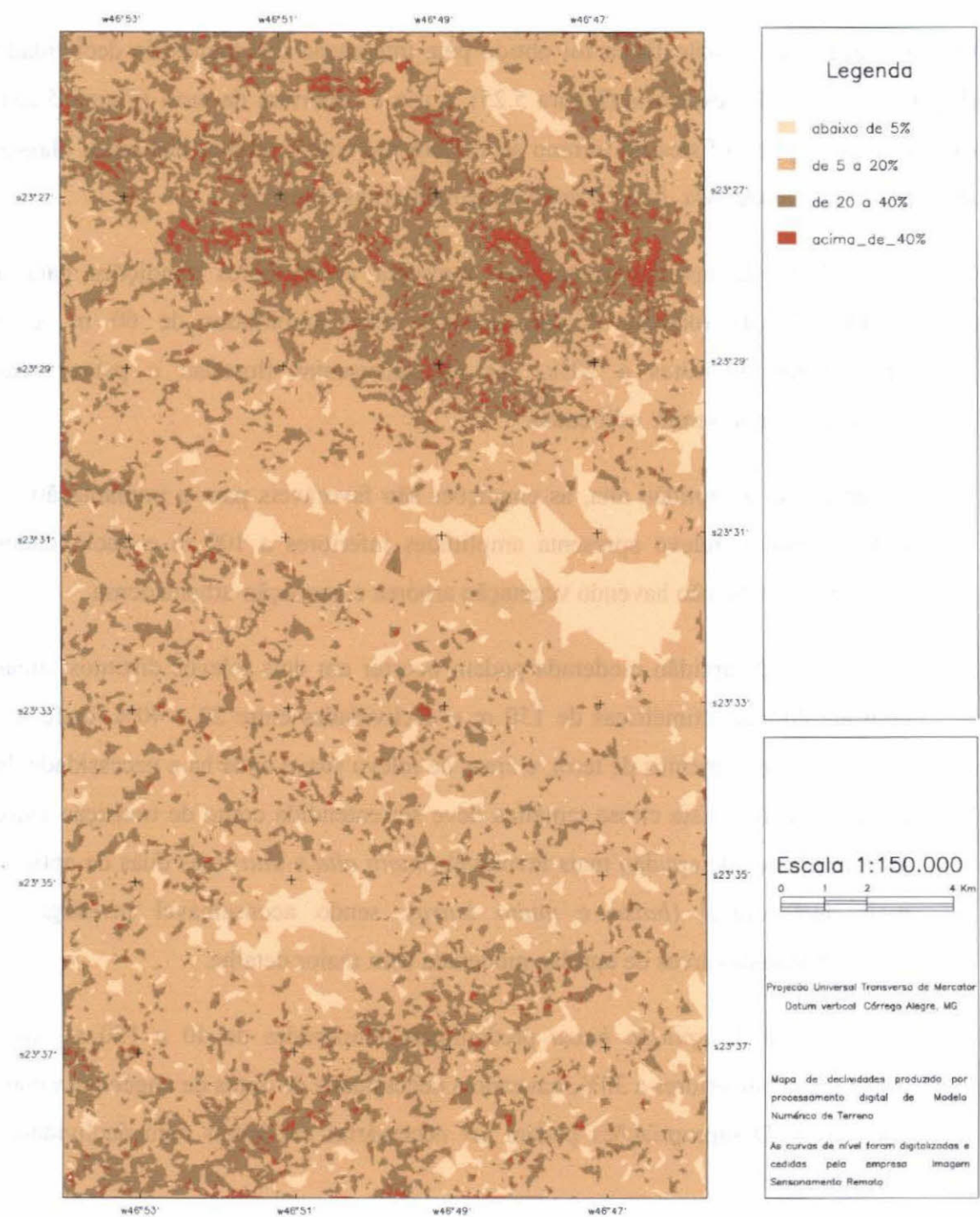


Fig. 5.27 - Mapa de declividades obtido conforme esquema da Figura 5.26.

d) Mapa-Síntese de Aptidão Física

O mapa-síntese de aptidão física foi obtido pela integração dos mapas de declividade (Figura 5.27), feições especiais (Figura 5.25), e uso e cobertura da terra (Figura 5.23), expressando a aptidão física do terreno ao projeto rodoviário através das cinco classes *muito alta*, *alta*, *moderada*, *baixa* e *muito baixa*, descritas abaixo:

- ✧ a classe de aptidão muito alta apresenta as melhores condições para a implantação da rodovia. É caracterizada pelas amplitudes de 60 m, com declividades inferiores a 20%, por não apresentar florestas e pelas áreas antropizadas não serem edificadas;
- ✧ na classe de aptidão alta, as condições são favoráveis para a implantação da rodovia, pois o relevo apresenta amplitudes inferiores a 100 m e declividades inferiores a 20%, não havendo vegetação arbórea e ocupação urbana densa;
- ✧ as áreas de aptidão moderada podem ocorrer em dois relevos distintos: áreas com amplitudes altimétricas de 150 m e declividades entre 20 e 40%, onde são necessários movimentos de terra, e áreas de relevo suave onde há a necessidade de desapropriações. Esta classe temática deve ser entendida como de transição entre as duas classes de aptidão mais favorável (*muito alta* e *alta*) e as duas de aptidão mais desfavorável (*baixa* e *muito baixa*), sendo aconselhável investigar a interceptação das áreas de aptidão moderada com maior detalhe.
- ✧ na classe de aptidão baixa predominam amplitudes de 40 e 150 m, com declividades superiores a 30%, havendo a necessidade de obras de engenharia mais complexas. Desapropriações podem ser necessárias em locais com declividades entre 20 e 40%.
- ✧ a classe aptidão muito baixa deve ser evitada por apresentar pelo menos um dos seguintes eventos: amplitudes altimétricas de até 300 m, declividades superiores a 40%, planícies aluviais fora da mancha urbana, áreas urbanas com alta

densidade de ocupação, indústrias ou áreas ocupadas por floresta nativa pouco degradada.

Os resultados obtidos pela integração dos mapas básicos por (a) *expressão matemática* e (b) *associação lógica* são apresentados a seguir:

✧ o procedimento de integração por expressão matemática consistiu na multiplicação das notas atribuídas aos mapas básicos, conforme ilustra a Figura 5.28. Os PI's de declividades, de uso e cobertura da terra e de feições especiais foram convertidos em grades regulares contendo as notas {0, 1, 2, 3} atribuídas conforme mostra as Tabelas 5.2, 5.3 e 5.4, respectivamente. Pela multiplicação destas grades regulares foi obtida uma nova grade regular contendo os valores {0, 1, 2, 3, 4, 6, 8, 9, 12, 18 e 27}, que foi transformada no mapa-síntese de aptidão física (Figura 5.29) através da operação de fatiamento, segundo as relações apresentadas na Tabela 5.5. Estas relações foram estabelecidas de modo a que houvesse coerência entre as classes temáticas obtidas no processo de integração e suas aptidões físicas à implantação do projeto rodoviário;

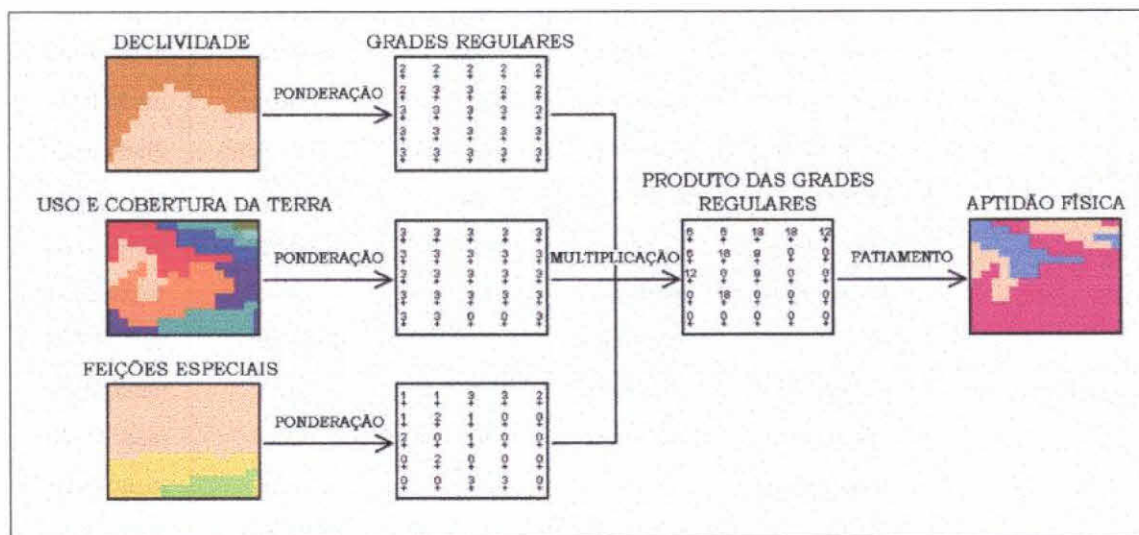


Fig. 5.28 - Seqüência operacional utilizada na produção do mapa-síntese de aptidão física.

TABELA 5.5 - RELAÇÕES UTILIZADAS NO PROCESSO DE FATIAMENTO

Valor da grade regular	Classe de aptidão física
27	Muito alta
12 e 18	Alta
4, 6, 8 e 9	Moderada
1, 2, e 3	Baixa
0	Muito baixa

✧ o procedimento de integração por associações lógicas consistiu em descrever e qualificar todas as combinações possíveis entre as classes dos mapas básicos, conforme mostra a Tabela 5.6. Como todas as classes dos mapas básicos estão associadas a apenas quatro níveis de aptidão física à implantação do traçado, foi necessário descrever apenas 64 combinações entre estas classes (4 classes de declividade x 4 classes de uso e cobertura da terra x 4 de declividade).

TABELA 5.6 - DEFINIÇÃO DAS CLASSES DE APTIDÃO

Feições especiais	Declividade	Uso e Cobertura da terra			
		preferencial	favorável	desfavorável	impróprio
preferencial	preferencial	muito alta	alta	moderada	muito baixa
	favorável	alta	alta	moderada	muito baixa
	desfavorável	moderada	moderada	baixa	muito baixa
	imprópria	muito baixa	muito baixa	muito baixa	muito baixa
favorável	preferencial	muito alta	alta	moderada	muito baixa
	favorável	alta	moderada	moderada	muito baixa
	desfavorável	moderada	moderada	baixa	muito baixa
	imprópria	muito baixa	muito baixa	muito baixa	muito baixa
desfavorável	preferencial	moderada	moderada	baixa	muito baixa
	favorável	moderada	moderada	baixa	muito baixa
	desfavorável	baixa	baixa	baixa	muito baixa
	imprópria	muito baixa	muito baixa	muito baixa	muito baixa
imprópria	preferencial	muito baixa	muito baixa	muito baixa	muito baixa
	favorável	muito baixa	muito baixa	muito baixa	muito baixa
	desfavorável	muito baixa	muito baixa	muito baixa	muito baixa
	imprópria	muito baixa	muito baixa	muito baixa	muito baixa

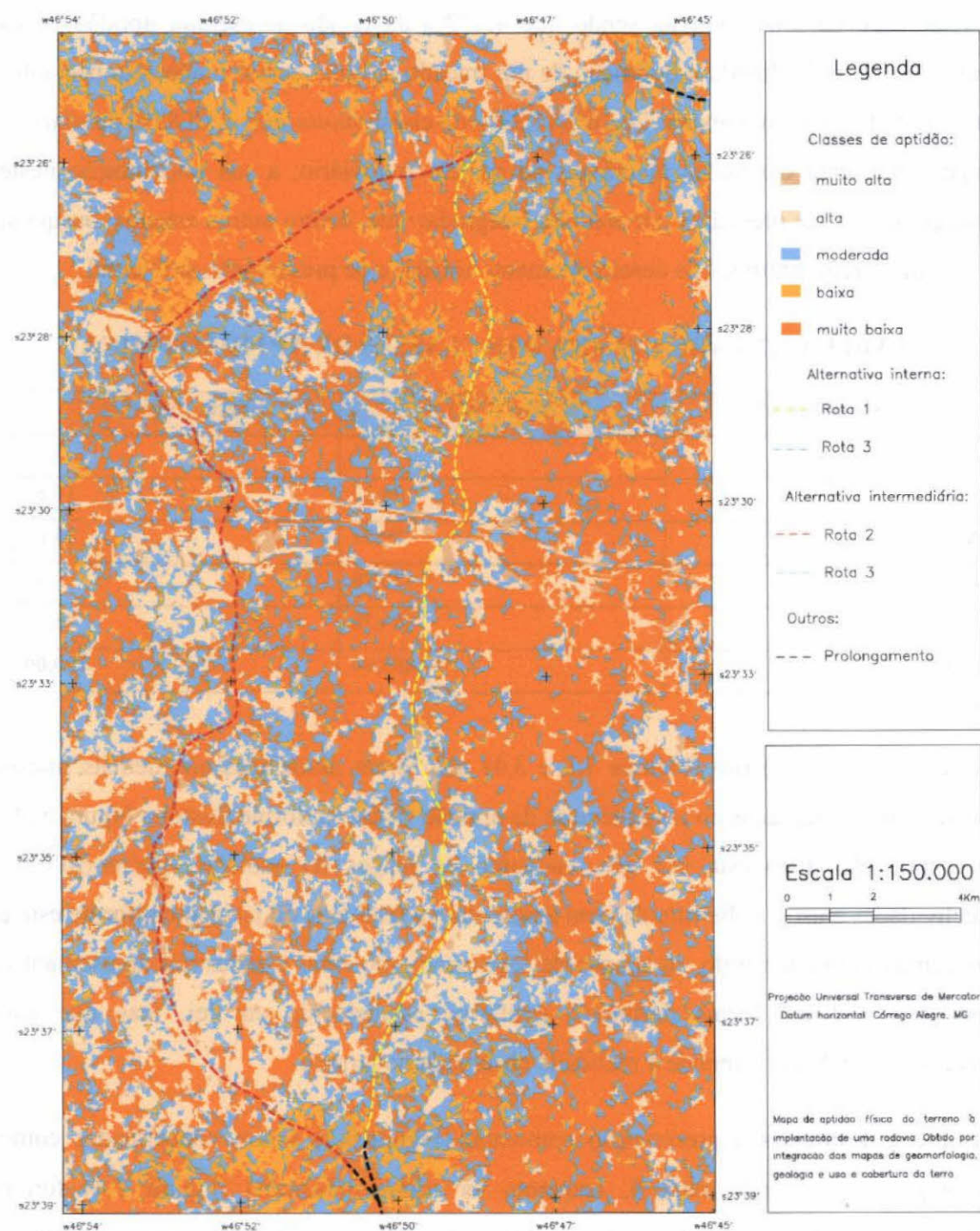


Fig. 5.29 – Mapa-síntese de aptidão física, obtido pela integração dos mapas básicos.

A Tabela 5.7 mostra que mais da metade da área de estudo (55,22%) é inapta à implantação de uma rodovia, sendo que 45,77% da região apresentou aptidão física *muito baixa*, dificultando a definição de um traçado no qual custos e ações impactantes sejam mínimos. Como apenas 20,16% (1,33% da classe *muito alta* e 18,83% de *alta*) da região apresenta condições favoráveis ao projeto rodoviário, a sua implantação neste espaço deverá ser precedida por análises integradas que, dentre outros estudos, busquem compatibilizem diretrizes de desenvolvimento urbano e de preservação ambiental.

TABELA 5.7 – ÁREA PLANA DAS CLASSES DE APTIDÃO FÍSICA

Classe de aptidão	Área (km ²)	Percentual (%)
Muito alta	5,36	1,33
Alta	76,27	18,83
Moderada	99,71	24,62
Baixa	38,28	9,45
Muito baixa	185,38	45,77
Total	405,00	100,00

As áreas de uso restrito (Figuras 3.3 e 3.4) não foram associadas aos demais mapas básicos, mas integradas ao mapa-síntese de aptidão física conforme ilustra a Figura 5.30. A explicação disto está em que, enquanto os mapas de geologia, geomorfologia, declividades e uso e cobertura da terra apresentam a realidade do terreno conforme esta é percebida pelo cartógrafo, os mapas de legislação ambiental e industrial apresentam o uso desejável em locais definidos, conforme estabelecido em lei, mas que não necessariamente corresponde à realidade observada no terreno.

As áreas destinadas à preservação ambiental (Figura 3.3) foram conceituadas como *impróprias*, recebendo nota 0, enquanto as zonas industriais (Figura 3.4) foram qualificadas como *desfavoráveis*, recebendo nota 1, não sendo definidas como críticas ao projeto rodoviário porque algumas das áreas destinadas ao uso industrial podem não estar efetivamente ocupadas por indústrias, conforme propõe a legislação.

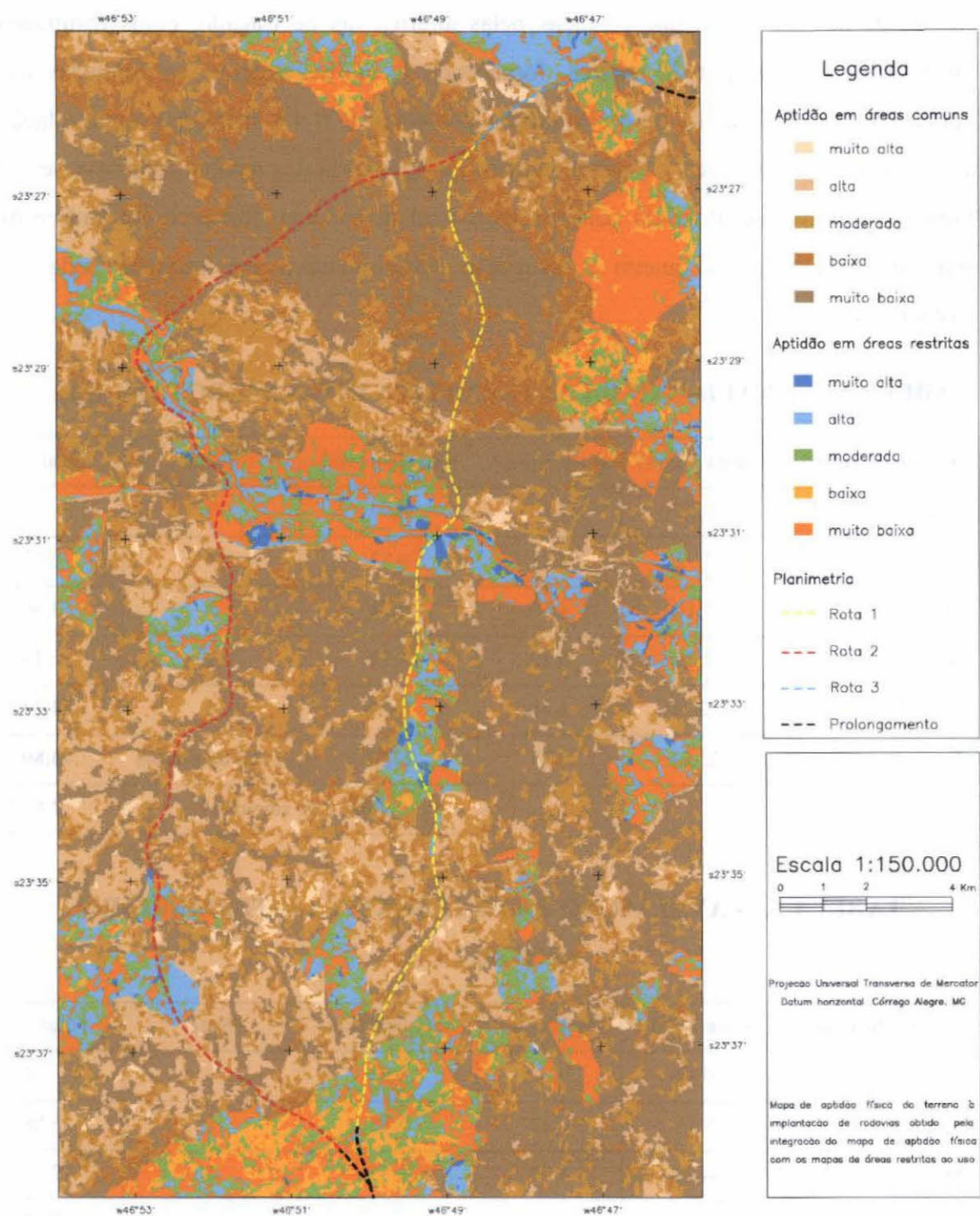


Fig. 5.30 – Mapa-síntese de aptidão física destacando áreas de uso restrito.

Através do procedimento de contagem de “pixels”, foram quantificadas as extensões de classes de aptidão física interceptadas pelas alternativas de traçado, cujos resultados foram multiplicados por 30 metros, fornecendo as quilometragens apresentadas nas Tabelas 5.8 e 5.9. Estas foram multiplicadas por notas de 0 a 4 atribuídas numa relação inversa à aptidão física das classes temáticas. Da somatória dos resultados obteve-se um **Total de pontos** que, dividido pela extensão total da rodovia, forneceu um **Índice de rejeição** indicativo do quanto a execução da alternativa em questão pode ser problemática.

TABELA 5.8 - AVALIAÇÃO DA ALTERNATIVA INTERNA (ROTAS 1 E 3)

Classe de aptidão	Rota 1 (km)	Rota 3 (km)	Extensão (km)	Nota	Total
Muito alta	0,75	0,12	4,44	0	0
Alta	3,72	1,23	0,87	1	0,87
Moderada	5,10	1,50	6,78	2	13,56
Baixa	1,26	0,12	1,71	3	5,13
Muita baixa	12,18	1,38	13,56	4	54,24
Total	23,01	4,35	27,36	Total de pontos	73,80
Índice de rejeição					2,69

**TABELA 5.9 - AVALIAÇÃO DA ALTERNATIVA INTERMEDIÁRIA
(ROTAS 2 E 3)**

Classe de aptidão	Rota 2 (km)	Rota 3 (km)	Extensão (km)	Nota	Total
Muito alta	0,18	0,75	0,93	0	0
Alta	5,76	0,12	5,88	1	5,88
Moderada	6,78	1,77	8,55	2	17,10
Baixa	2,31	0,33	2,64	3	7,92
Muita baixa	13,92	1,38	15,30	4	61,20
Total	28,95	4,35	33,30	Total de pontos	92,10
Índice de rejeição					2,77

A alternativa Interna apresentou um Total de pontos de 73,80 e um Índice de rejeição de 2,69 (Tabela 5.8), enquanto a Intermediária, 92,10 e 2,77 (Tabela 5.9), favorecendo a escolha da alternativa Interna. Como a Intermediária é 18,3 km maior, era de se esperar que o Total de pontos desaconselhasse a sua escolha, mas a extensão total do traçado foi considerada pelo Índice de rejeição, que também recomendou a alternativa Interna.

A Tabela 5.10 foi elaborada a partir do mapa da Figura 5.30 e mostra que a alternativa Intermediária interceptou 9,21 km de áreas destinadas à preservação ambiental, enquanto a alternativa interna, 6,84 km (sendo 5,49 km em áreas de preservação ambiental e 1,35 km em zonas industriais). Portanto, houve uma diferença de 2,37 km a favor da Interna. Em termos apenas de áreas de proteção ambiental, esta diferença aumenta para 3,72 km.

TABELA 5.10 - DADOS DE ANÁLISE DAS ALTERNATIVAS DE TRAÇADO

Item	Parâmetro de avaliação	Alternativa interna	Alternativa intermediária
1	Total de pontos	73,80	92,10
2	Índice de rejeição	2,69	2,77
3	Áreas de preservação ambiental	5,49	9,21
4	Zonas industriais	1,35	-

A síntese dos resultados apresentada na Tabela acima permite verificar que a alternativa Interna apresentou os menores valores de Total de pontos e de Índice de rejeição (itens 1 e 2), além de interceptar menos áreas de preservação ambiental (item 3), enquanto a Intermediária apresentou a vantagem de não interceptar zonas industriais (item 4). Isto permite concluir que a alternativa Interna deve ser selecionada por interceptar menos áreas críticas, tanto do ponto de vista da fisiografia, como da preservação ambiental.

A partir do mapa-síntese de aptidão física foi possível definir e avaliar alternativas de traçado. Esta análise poderia ainda contemplar uma infinidade de avaliações envolvendo outros dados não considerados no modelo conceitual adotado, evidenciando informações úteis à tomada de decisão na escolha do traçado. Por exemplo, é possível analisar alternativas de traçado num mapa que apresente a distribuição da altimetria dentro das áreas classificadas como de aptidão física *muito baixa*, conforme mostra a Figura 5.31.

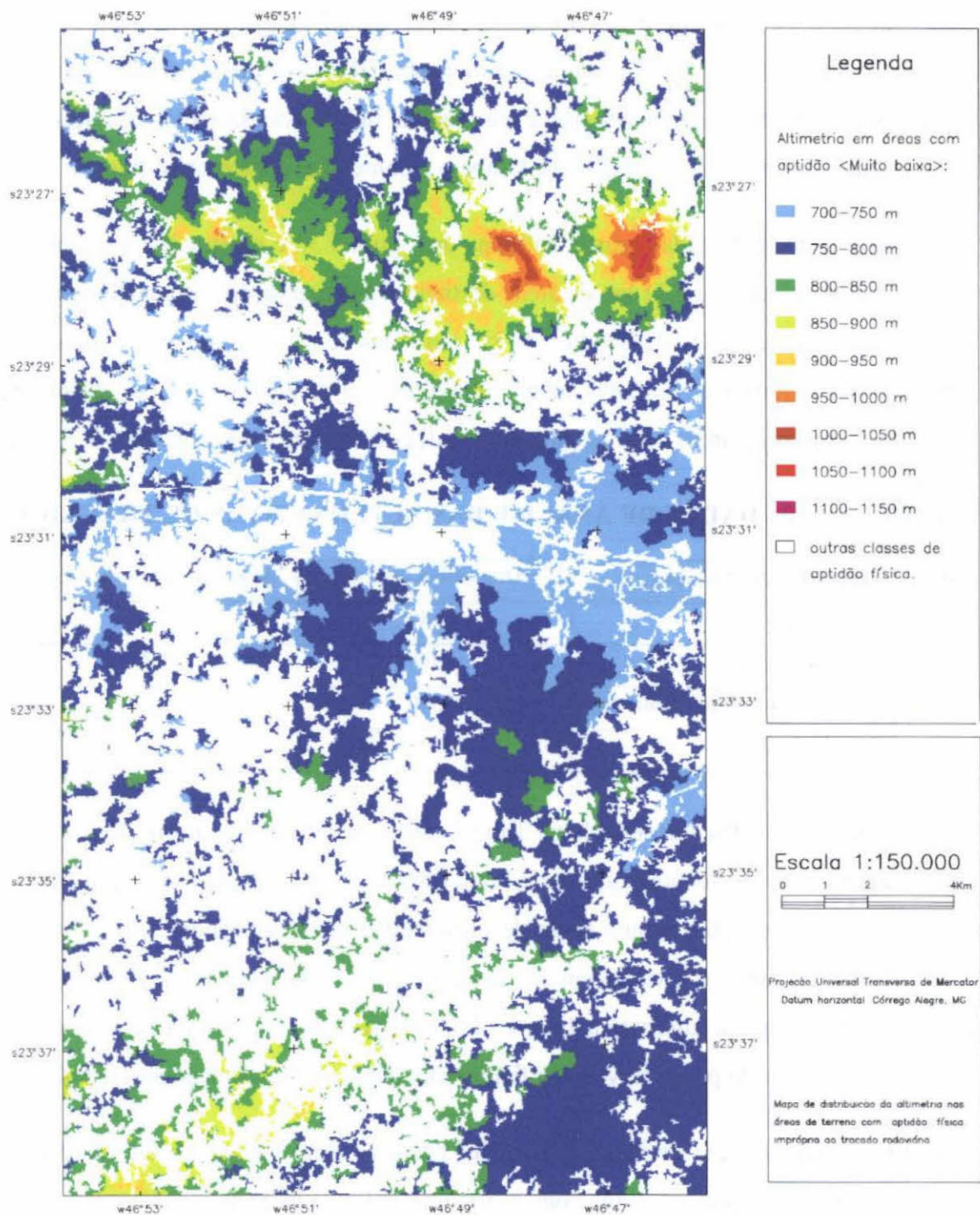


Fig. 5.31 - Integração entre a classe de muito baixa aptidão física e dados de altimetria.

5.1.5 Alternativa de Traçado Proposta

Até o presente momento, a análise dos traçados considerou apenas as alternativas Interna e Intermediária, mas é possível delinear variantes a estas, desenhadas sobre o mapa-síntese de aptidão física (Figura 5.29) com o auxílio de alguns mapas básicos utilizados em sua confecção, conforme mostra a Figura 5.32.

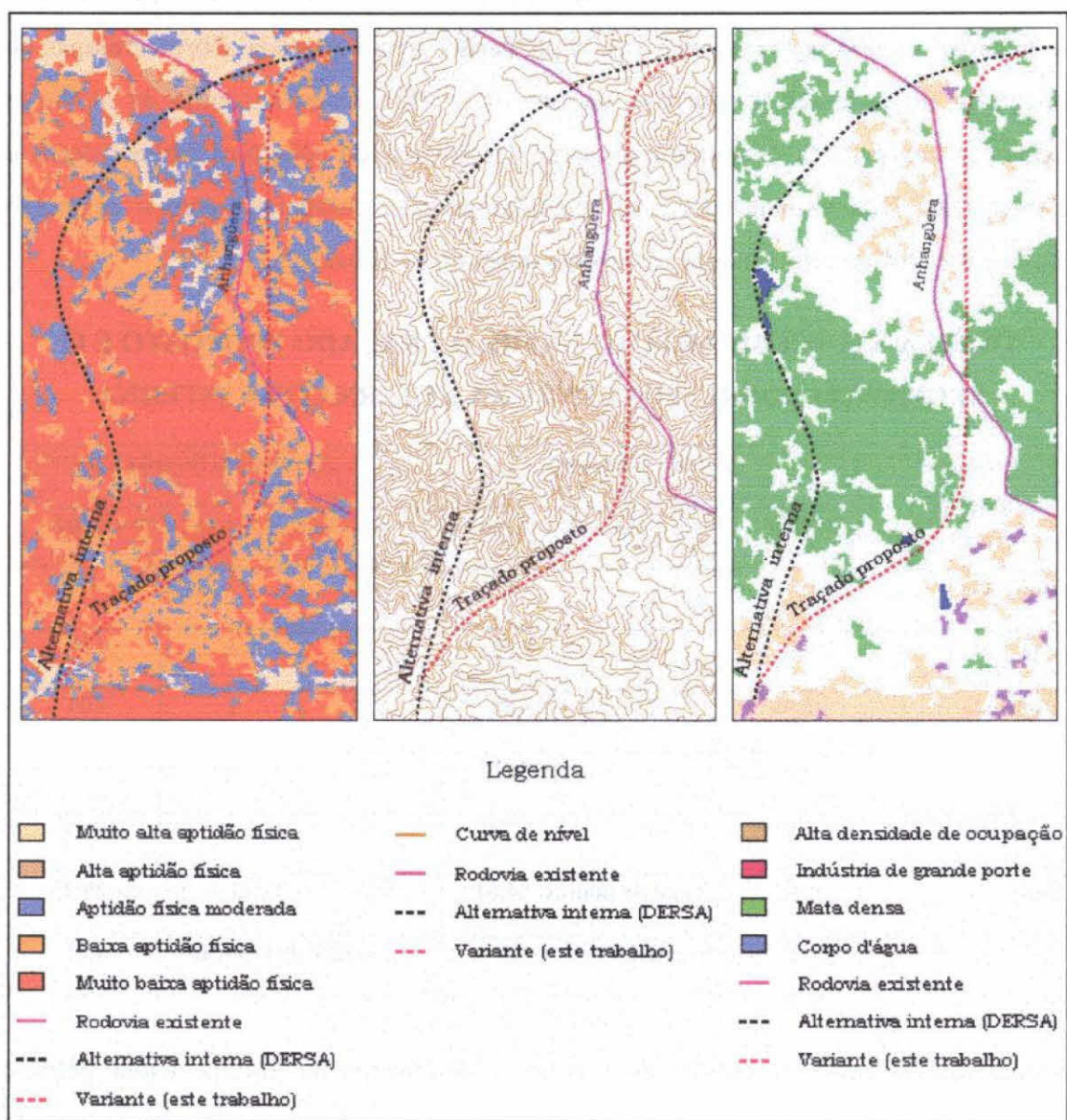


Fig. 5.32 - Alternativa de traçado definida sobre o mapa de aptidão física (a) e ajustado sobre os mapas de topografia (b) e de uso e cobertura da terra (c).

Conforme se observa na Figura 5.32, foi definida uma variante (em cor preta) para um segmento de alternativa Interna (em cor vermelha) que atravessa uma área de mata densa, em uma região colinosa (unidades morfológicas de morros baixos e de morros altos), próximo ao cruzamento com a rodovia Anhangüera (em cor rosa), localizada entre o município de Santana de Parnaíba e o distrito de Anhangüera, em São Paulo.

A variante foi definida sobre o mapa-síntese de aptidão física (a), na qual foram evitadas as áreas de *aptidão muito baixa* à sua implantação, sendo ajustada sobre os mapas de topografia (b) e de uso e cobertura da terra (c), a fim de se encontrar as melhores condições topográficas, bem como as áreas desprovidas de cobertura arbórea densa e desocupadas. Esta variante pode ser quantitativamente comparada com o segmento equivalente da alternativa Interna, conforme mostram as Tabelas 5.11 e 5.12.

TABELA 5.11 - COMPARAÇÃO ENTRE O TRAÇADO PROPOSTO E O SEGMENTO CORRESPONDENTE DA ALTERNATIVA INTERNA

Classe de aptidão	Traçado proposto				Alternativa Interna			
	km	x	Nota	= Total	km	x	Nota	= Total
Muito alta	0,03		0	0	0,12		0	0
Alta	0,60		1	0,60	0,81		1	0,81
Moderada	2,91		2	5,82	2,52		2	5,04
Baixa	3,69		3	11,07	1,44		3	4,32
Muito baixa	1,83		4	7,32	4,77		4	19,08
Total	9,06		Total de pontos: 24,81		9,66		Total de pontos: 29,25	
	Índice de rejeição:			2,74	Índice de rejeição:			3,03

A comparação entre os Índices de rejeição apresentados na Tabela acima permite concluir que o procedimento aqui sugerido para o delineamento de alternativas de traçado possui vantagens sobre a metodologia tradicional, podendo conferir uma maior eficiência no processo investigatório da fase de reconhecimento. No entanto, a validação

plena de tal afirmação é impossibilitada porque na elaboração do traçado aqui proposto não foram consideradas as características físicas e geométricas do Rodoanel, bem como diversos outros aspectos peculiares à alternativa Interna.

Convém ainda observar que a alternativa Interna intercepta 6,21 km de áreas críticas (1,44 km de *baixa aptidão* e 4,77 km de *muito baixa aptidão*), enquanto a variante intercepta 5,52 km (3,69 de *baixa aptidão* e 1,83 km de *muito baixa aptidão*). As extensões das principais classes dos mapas de uso e cobertura da terra, feições especiais e declividades interceptadas pela alternativa Interna e pelo traçado proposto são apresentadas na Tabela 5.12.

**TABELA 5.12 - ÁREAS INTERCEPTADAS DE MUITO BAIXA APTIDÃO
FÍSICA**

Opção de traçado	Uso e cobertura da terra				Feições especiais	Declividade
	Indústrias (km)	Alta densidade (km)	Mata densa (km)	Corpos d'água (km)	Planície aluvial fora da área urbana (km)	Acima de 40% (km)
Alternativa Interna	-	0,78	3,21	0,15	0,69	0,18
Traçado proposto	-	0,21	1,17	-	0,63	0,30

CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A metodologia apresentada neste estudo mostrou-se adequada aos procedimentos realizados na fase de reconhecimento do projeto rodoviário, tanto no processo de investigação da faixa de terreno, quanto na definição de traçados e na análise de sua viabilidade.

As técnicas de sensoriamento remoto e de geoprocessamento utilizadas neste trabalho podem ser aplicadas na fase de reconhecimento de um projeto rodoviário conforme os passos descritos abaixo:

- 1) a partir das imagens orbitais, são identificadas as restrições físicas e ambientais na região em estudo, resumidas num mapa-síntese de aptidão física ao projeto rodoviário, no qual são desenhadas as alternativas de traçado;
- 2) para cada alternativa é elaborado um inventário nos moldes das Tabelas 5.8 e 5.9 indicando a extensão de áreas críticas interceptadas e identificando as alternativas mais viáveis;
- 3) o mapeamento realizado é confirmado através de visitas de campo a locais em dúvida, realizando-se nova análise e identificando-se a alternativa ótima. Finalmente, é realizado um levantamento aerofotogramétrico do seu traçado, sobre o qual serão realizados os estudos necessários para consolidá-lo e os detalhamentos de projeto das fases subsequentes.

A implementação, no projeto rodoviário, das etapas descritas acima, pode resultar em economia de tempo e de recursos financeiros, devido à rapidez com que os mapas temáticos podem ser confeccionados e editados, bem como à rapidez com que podem ser avaliadas as alternativas de traçado. Estes benefícios são mais evidenciados na medida em que é dinamizada a ocupação urbana na região, quando alterações substanciais no uso e ocupação do solo são verificadas em curtos intervalos de tempo. Um exemplo da

necessidade de se otimizar o processo de análise geográfica é encontrado no próprio projeto do Rodoanel, cujas atividades iniciais datam de 1990 e foram paralisadas em diversas ocasiões, de modo que, a cada retomada atualizava-se novamente o sistema cartográfico e revisava-se as alternativas de traçado já definidas.

Com relação ao Rodoanel, a metodologia aqui apresentada atendeu as diretrizes estabelecidas para a implantação do seu Trecho Oeste (citadas na página 45 deste documento), permitindo identificar e quantificar as áreas críticas interceptadas pelas suas alternativas de traçado. Em conformidade com estas diretrizes, foram identificadas áreas de uso restrito e áreas com relevo acidentado, solos inadequados ao suporte do leito rodoviário, adensamento urbano, unidades industriais e corpos d'água. Para que as demais diretrizes não atendidas sejam cumpridas, pode-se alterar a metodologia conforme descrito abaixo:

- ✧ a definição dos limites da faixa de estudo pode ser efetuada a partir de imagens orbitais. No caso desta região já estar definida, a sua demarcação pode ser efetuada através da entrada de suas coordenadas cartográficas em SIG;
- ✧ a adequação do Rodoanel aos sistemas viários locais, bem como o seu proveito para se racionalizar e otimizar a intermodalidade rodoferroviária pode ser efetuada em SIG, montando-se um banco de dados com informações de tráfego associadas a rodovias, avenidas e ruas. Desta forma, podem ser elaboradas projeções de situações do trânsito para os próximos anos e décadas, calculadas para a configuração da malha viária atual e após implantado o Rodoanel;
- ✧ a organização e o desenvolvimento urbano local e inter-regional podem ser monitorados em SIG, criando-se um banco de dados com indicadores populacionais e sócio-econômicos dos setores da região em estudo. Os vetores de expansão urbana podem ser identificados em estudos com imagens multi-temporais, de modo a auxiliar na definição de ações para a inibição do crescimento urbano ao sul e norte e a sua indução a leste e oeste.

No presente momento, as melhores imagens orbitais são produzidas pelos sensores TM-Landsat e HRV-SPOT. As imagens TM apresentam maior resolução espectral e facilidades de aquisição a um menor custo, pois o INPE possui um banco de dados com todas as imagens obtidas sem cobertura de nuvens desde 1984. As imagens SPOT têm como principal vantagem a resolução espacial de 20 e 10 metros, de maior utilidade em estudos intra-urbanos. Porém, apresentam baixa resolução espectral (duas bandas no visível, uma no infravermelho próximo e uma pancromática) e o acervo de imagens do território brasileiro é restrito, contendo apenas as imagens realizadas por ocasião da solicitação de clientes.

O uso da imagem TM permitiu identificar as feições de uso e cobertura da terra de importância para um projeto rodoviário, conforme citado na seção 2.1 (Página 21). A partir de imagens TM é possível mapear feições de interesse geotécnico e unidades geomorfológicas, além de outros aspectos fisiográficos. A perspectiva do uso de imagens orbitais no projeto rodoviário é, portanto, otimista, visto que em breve estarão disponíveis as imagens produzidas por sistemas sensores orbitais com maiores resoluções espacial e espectral.

Com relação aos processamentos digitais de imagens empregados para a extração das feições de uso e cobertura da terra, conclui-se que:

- ✧ apesar do constante avanço tecnológico verificado nesta área, a interpretação visual ainda é um recurso eficiente para a produção de mapas temáticos e apresenta a vantagem de permitir o uso do bom senso do fotointérprete. Esta técnica não foi aplicada neste trabalho devido a que seria necessário visualizar a imagem em escalas grandes que, conforme visto na Figura 5.17a, degradam a imagem e dificultam a interpretação visual;
- ✧ o processamento digital de imagens permitiu identificar, com rapidez, alvos de pequena dimensão em função da resolução radiométrica dos mesmos. O mapeamento realizado por meio desta técnica considerou apenas os parâmetros de

tonalidade e textura, descartando os parâmetros de forma, localização e relação de aspectos, peculiares ao procedimento de interpretação visual de imagens;

✧ a opção pela classificação supervisionada por distância de Bhattacharyya das bandas TM contrastadas e segmentadas, foi definida após exaustivas tentativas em que foram aplicadas técnicas de Transformação por Componentes Principais, Índice de Vegetação, operações aritméticas e classificação por MAXVER e ISOSEG. Estas técnicas não forneceram resultados satisfatórios ao nível de detalhe exigido neste trabalho, pois dificultaram a classificação de feições pequenas mas importantes, como as indústrias. As tentativas de realçar tais feições por meio destas técnicas, geralmente causavam a degradação da resolução radiométrica de outras feições de interesse;

✧ a interpretação automática de imagens TM apresenta a vantagem de otimizar o mapeamento de uma região, não dispensando, no entanto, atividades de conferência e edição do produto obtido;

✧ a utilização de técnicas de processamento digital de imagens pode não ser aconselhável quando não houver uma metodologia consagrada para a obtenção dos resultados desejados, pois a pesquisa de novas técnicas pode consumir muito tempo e recursos.

Com relação aos produtos obtidos a partir das técnicas de integração utilizadas neste trabalho, espera-se que o mapa-síntese de aptidão física possa auxiliar a tomada de decisão baseada na comparação qualitativa e quantitativa das alternativas de traçado.

A partir do mapa-síntese de aptidão física foi analisada a viabilidade de cada uma das alternativas de traçado, identificando-se a melhor opção em termos do esquema conceitual adotado neste trabalho. Outras opções de análise poderiam ser implementadas atribuindo-se notas em razão direta com a aptidão física das classes temáticas apresentada nas Tabelas 5.8 e 5.9, quando então as alternativas seriam comparadas em

termos das melhores condições de terreno interceptadas, obtendo-se um fator de viabilidade para os traçados.

Dentre os dois procedimentos utilizados na produção do mapa-síntese de aptidão física, o método da multiplicação de grades regulares (integração por expressão matemática), apesar de mais complexo, apresenta maior flexibilidade para se incluir ou excluir classes temáticas ou PI's, sendo adequado à investigação de uma região onde seja necessário analisar diversos dados temáticos.

O procedimento baseado em associações lógicas permite descrever com clareza e objetividade as combinações entre as classes temáticas, bem como conceituá-las individualmente. Na integração por expressão matemática, o conceito de aptidão é atribuído a intervalos de valores aos quais estão associadas diversas combinações de classes temáticas, impedindo que estas sejam conceituadas individualmente. A integração por associações lógicas possui a desvantagem de ser mais trabalhosa que a integração por expressão matemática.

Portanto, os dois procedimentos de integração apresentam vantagens distintas, que podem ser aproveitadas conforme a necessidade do estudo, ou seja:

- ✧ quando a análise envolver muitos PI's, é aconselhável realizar a integração por expressão matemática;
- ✧ quando for necessário discriminar os resultados de combinações específicas entre classes temáticas, convém utilizar associações lógicas.

O parâmetro de *Total de pontos* forneceu o montante das áreas críticas dos mapas fisiográficos que foram interceptadas, enquanto o *Índice de rejeição* relacionou este montante com a extensão total do traçado. Caso estes valores sejam contraditórios e não possibilitem selecionar uma alternativa de traçado, a tomada de decisão deve ser efetuada em termos das áreas de uso restrito interceptadas.

A alternativa Interna corresponde àquela selecionada pelo DERSA para o Trecho Oeste do Rodoanel, mas o traçado utilizado neste trabalho foi delineado em 1992 e sofreu alterações substanciais desde então. Comparando-se as Figuras 5.23 e 5.29 observa-se que muitas das áreas de *muito baixa aptidão física* interceptadas correspondem a áreas urbanas com alta densidade de ocupação. Quando seu traçado foi delineado, a ocupação urbana ainda não havia se consolidado nestes locais, de modo que o traçado apresentado neste trabalho intervém em mais áreas críticas do que o projeto atual.

O modelo conceitual utilizado neste trabalho considerou variáveis que de alguma forma estão associadas a fatores impactantes dos pontos de vista ambiental e social, bem como a custos com desapropriações e questões de ordem técnica. Convém, no entanto, lembrar que um estudo mais detalhado requer a análise de uma gama maior de variáveis, tais como a avaliação dos impactos e aspectos funcionais, políticos ou questões relacionadas à fase de operação e à manutenção da rodovia, que precisam ser analisadas e com maior detalhamento e sob abordagens multi-disciplinares e multi-criteriais. Este modelo conceitual deve ser apreciado como uma das muitas possibilidades de aplicação das técnicas de sensoriamento remoto e de geoprocessamento em projetos rodoviários e em outros projetos de engenharia civil, tais como linhas de transmissão e transporte a longa distância de fluidos em geral.

A partir dos resultados obtidos neste trabalho, são apresentadas as seguintes recomendações para trabalhos futuros:

- 1) sugere-se que o comando da linguagem LEGAL utilizado para a contagem de “pixels” das alternativas de traçado seja modificado para considerar as variações topográficas do terreno, conferindo maior precisão à estimativa de extensão dos lineamentos;
- 2) sugere-se a implementação do mapa-síntese de aptidão física na elaboração dos seguintes documentos: Relatório Ambiental Preliminar (RAP), Estudo de Impacto Ambiental (EIA) e Relatório de Impacto Ambiental (RIMA);

- 3) que sejam elaboradas planilhas de orçamentos preliminares para a análise das alternativas de traçado, contemplando diversos aspectos fisiográficos. Poderia também ser pesquisada uma forma de incluir o mapa-síntese de aptidão física no processo orçamentário, associando-se índices de custo às suas classes temáticas;
- 4) que as avaliações de alternativas de traçado realizadas nos próximos trabalhos considerem a disponibilidade de materiais para jazidas e facilidades de métodos construtivos;
- 5) o pacote computacional do SPRING ainda não está concluído e tem sido constantemente aperfeiçoado, o que possibilita a pesquisa de sua utilização em estudos realizados em grande escala, tal como a fase de exploração de um projeto rodoviário.

Neste trabalho foi associada a tecnologia desenvolvida num centro de pesquisa, o INPE, com as necessidades de um centro de aplicação, o DERSA. É importante viabilizar as inovações tecnológicas do sensoriamento remoto e do geoprocessamento nas diversas áreas profissionais onde é cabível a sua aplicação, de modo que as dissertações em nível de mestrado possam contribuir com projetos e serviços onde seja premente a aplicação destas tecnologias. No Brasil, a engenharia civil apresenta um vasto campo de aplicação destas ferramentas, cabendo às instituições responsáveis pela transferência destas tecnologias, estarem atentas às necessidades deste ramo profissional, e aos engenheiros civis que detêm tais conhecimentos, implementá-los no meio.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Anderson, J. R.; Hardy, E. E.; Roach, J. T.; Witmer, R. E. **Sistema de classificação do uso da terra e do revestimento do solo para utilização com dados de sensores remotos**. Rio de Janeiro: IBGE, 1979. 78p. (Geological Survey Circular 671).
- Aronoff, S. **Geographic information systems: a management perspective**. Ottawa: WDL, 1989. 294p.
- Autún, J. P.; Santos, C. L.; Lozano, A. Escenarios de impacto de una nueva autopista en la logística de distribución metropolitana. In: Simposio Latinoamericano de Percepción Remota, 6., Colômbia, 1993. **Anais**. SLP. p.547-567.
- Barbosa, C. C. G. B. **Álgebra de mapas e suas aplicações em sensoriamento remoto e geoprocessamento**. São José dos Campos. 152p. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 1997.
- Bellia, V.; Bidone, E. D. **Rodovias, recursos naturais e meio ambiente**. Rio de Janeiro: EDUFF, 1993. 360p.
- Bins, L. S.; Erthal, G. J.; Fonseca, L. M. G. Um método de classificação não supervisionada por regiões. In: Simpósio Brasileiro de Computação Gráfica e Processamento de Imagens, 6., Recife, PE, 1993. **Anais**. Recife: SBC/UFPe, 1993. v.2, p.65-68.
- Bins, L. S.; Fonseca, L. M. G.; Erthal, G. J.; Li, F. M. Satellite Imagery Segmentation: a region growing approach. [CD ROM]. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 8., Salvador, 1996. **Anais**. São José dos Campos: INPE.
- Brasil. **Lei nº 6.803 de 2 de julho de 1980**. Dispõe sobre as diretrizes básicas para o zoneamento industrial nas áreas críticas de poluição, e dá outras providências. Brasil, 1980. 6p.

- Brasil. **Lei nº 6.902, de 27 de abril de 1981.** Dispõe sobre a criação de Estações Ecológicas, Áreas de Proteção Ambiental e dá outras providências. 1981. 2p.
- Brasil. **Lei nº 001, de 23 de janeiro de 1986.** Dispõe sobre as diretrizes gerais para o uso e implementação da Avaliação de Impacto Ambiental. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), 1986. 4p.
- Câmara, G. **Modelos, linguagens e arquiteturas para banco de dados geográficos.** Tese (Doutorado em Computação Aplicada) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 1995. 286p.
- Campos, R. A. **Projeto de estradas.** São Paulo: Escola Politécnica, 1979. 164p.
- Carrara, A. L. R. **Análise comparativa dos índices de vegetação em áreas urbanas obtidos de dados TM-Landsat e HRV-SPOT: Cidade de Taubaté.** São José dos Campos. (INPE-5418-TDI/482). Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 1992. 174p.
- Ceccato, V. A.; Foresti, C.; Kurkdjian, M. L. N. O. Proposta metodológica para avaliação da qualidade de vida urbana a partir de dados convencionais e de sensoriamento remoto, Sistema de Informações geográficas (SIG) e de um banco de dados. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 7., **Anais.** São José dos Campos: INPE, 1993. v. 1, p. 32-39.
- Ceccato, V. A. **Proposta metodológica para avaliação da qualidade de vida urbana a partir de dados convencionais e de sensoriamento remoto, sistema de informações geográficas e banco de dados.** São José dos Campos. (INPE-5552-TDI/536). Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 1994. 110p.
- Costa, S. M. F. **Avaliação de técnicas de processamento digital de imagens TM-Landsat aplicadas à delimitação de áreas urbanas.** São José dos Campos.

(INPE-5071-TDL/410). Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 1989. 125p.

Costa, S. M. F. **Metodologia alternativa para o estudo do espaço metropolitano, integrando as tecnologias de SIG e sensoriamento remoto - aplicação à área metropolitana de Belo Horizonte**. São Paulo: USP. Escola Politécnica. 179p. Tese (Doutorado em Engenharia). 1996.

Crósta, A. P. **Processamento digital de imagens de sensoriamento remoto**. Edição revisada. Campinas: UNICAMP. 1992. 170p.

De Biasi, M. A carta clinográfica: os métodos de representação e sua confecção. **Revista do Departamento de Geografia da USP**, n.6. p.45-60. 1992.

Departamento para a Preservação dos Recursos Naturais (DEPRN). **Projeto Olho Verde**: ata da reunião realizada em 7.nov.1994 para a redefinição da legenda de vegetação. São José dos Campos, 1994. 5p.

Desenvolvimento Rodoviário (DERSA). **Trecho oeste**: estudo de variantes de traçado. Mapa 3.2.1.3. São Paulo. 1992. (Escala 1:50.000).

Dmour, T. M.; Vaughan, R. A. Detection of urban growth towards agricultural areas in western Amman area of Jordan using remotely sensed data. In: Gudmandsen, P. **Future trends in remote sensing**. Rotterdam: Balkema. 1998. p.207-211.

Empresa Metropolitana de Planejamento da Grande São Paulo (EMPLASA) **Anel Viário de integração metropolitana - Rodoanel**: [Trecho Oeste] legislação ambiental e industrial. São Paulo, 1996a. (Escala 1:50.000).

_____ **Anel Viário de integração metropolitana - Rodoanel**: [Trecho Oeste] legislação de zoneamento municipal. São Paulo, 1996b. (Escala 1:50.000).

_____ **Anel Viário de integração metropolitana - Rodoanel**: [Trecho Oeste] mapa de declividades. São Paulo, 1996c. (Escala 1:50.000).