

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA-UFSC**  
**CENTRO TECNOLÓGICO**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL**

**Fábio Luis Vecili**

**SENSORIAMENTO REMOTO APLICADO AO**  
**MAPEAMENTO TEMÁTICO DO USO E COBERTURA DO SOLO**  
**NA BACIA DO CAETÉ, MUNICÍPIO DE ALFREDO WAGNER, SC**

**Florianópolis - Santa Catarina**

**Março de 2005**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA-UFSC**  
**CENTRO TECNOLÓGICO**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL**

**Fábio Luis Viecili**

**SENSORIAMENTO REMOTO APLICADO AO**  
**MAPEAMENTO TEMÁTICO DO USO E COBERTURA DO SOLO**  
**NA BACIA DO CAETÉ, MUNICÍPIO DE ALFREDO WAGNER, SC**

Projeto de Dissertação Submetido ao corpo docente do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal de Santa Catarina, como parte dos requisitos para obtenção do grau de mestre em Engenharia Ambiental na área de Gestão Ambiental em Bacias Hidrográficas.

***Orientador: Prof. César Augusto Pompêo, Dr.***

**Florianópolis - Santa Catarina**

**Março de 2005**

**“Sensoriamento Remoto Aplicado ao Mapeamento Temático do Uso e Cobertura do Solo na Bacia do Caeté, Município de Alfredo Wagner, SC”**

**Fábio Luis Vicili**

Dissertação submetida ao corpo docente do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal de Santa Catarina como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de

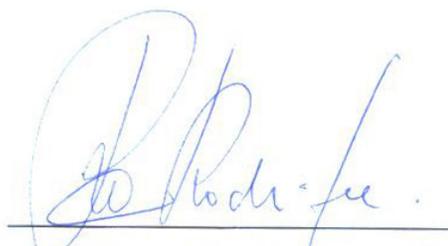
**MESTRE EM ENGENHARIA AMBIENTAL**

na Área de Planejamento de Bacias Hidrográficas

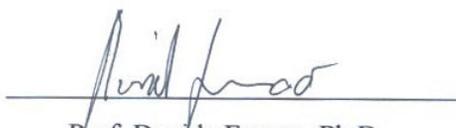
Aprovado por:



Prof.<sup>a</sup> Dora Maria Orth, Dr.<sup>a</sup>  
(Avaliador Externo)



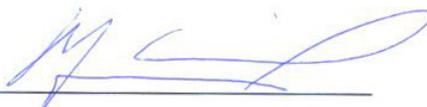
Prof.<sup>a</sup> Rosana Maria Rodrigues, Dr.<sup>a</sup>  
(Avaliador Externo)



Prof. Davide Franco, Ph.D.  
(Avaliador Interno)



Prof. César Augusto Pompêo, Dr.  
(Orientador)



Prof. Henry Xavier Corseuil, Ph.D.  
(Coordenador)

Florianópolis, SC - Brasil

Março/2005

*Chega um dia em que a gente  
Vai aos poucos percebendo  
Somos máquinas humanas  
Estamos sempre correndo  
O motor logicamente  
É o nosso coração  
A estrada é o tempo  
O passado é contramão  
[...]*

Paulo Sérgio  
de Máquinas Humanas

Dedico aos meus pais,  
Waldir e Marlene

Ofereço ao meu amor,  
Moanna

Agradeço em especial

ao meu orientador Pompêo, pela confiança depositada

aos docentes, que guiaram meu aprendizado

Sandra Sulamita Nahas Baash, “*Gestão Ambiental*”

Ruth Emília Nogueira Loch, “*Fundamentos da Cartografia*”

Clarice Maria Neves Panitz, “*Manejo Ambiental*”

Daniel José da Silva, “*Cognição e Sustentabilidade*”

César Augusto Pompêo, “*Tecnologias e Gestão da Água no Meio Urbano*”

Paulo Belli Filho e Luiz Sérgio Philippi, “*Sustentabilidade do Ambiente Rural*”

Édis Mafra Lapolli, “*Fundamentos e Técnicas de Sensoriamento Remoto*” e  
“*Sensoriamento Remoto Aplicado à Engenharia Ambiental*”

aos avaliadores Dora Maria Orth, Davide Franco e Rosana Maria Rodrigues, pelas contribuições neste

aos pesquisadores Eliana de Almeida, César Seibt e Jucineide Schmitz, pelo apoio e incentivo

ao Ciro Loureiro Rocha, Guilherme Xavier de Miranda, Masato Kobiyama, Zuleica Patrício, Elizabeth de Siervi, Cleciane Dias, Ivanete Masson, Paulo Pires, Edson Gonçalves, Roberto Silva, Tatiane Checchia, Tamara Caldart, José Luiz R. Oliveira, Alexandre Alves, César Pedro Oliveira, Guilherme Lima, Vicente Bauer Neto, Luiz Fernando Vianna, Conrado Rudorff e Marcos Silva, pela colaboração e convívio

aos munícipes de Alfredo Wagner, pela receptividade e amizade

aos meus irmãos, Daniel e Leandro, a minha sobrinha Mônica, e a família Matos, pela compreensão nos muitos momentos de ausência e pela incondicional confiança durante a realização desta pesquisa

além de todos amigos do velho oeste e colegas, que contribuíram, cada um de sua maneira, para a concretização deste

## RESUMO

Este trabalho tem como objetivo avaliar três técnicas de classificação do uso e cobertura do solo, a partir do processamento digital de imagens do sensor ETM<sup>+</sup> do satélite Landsat-7, no Sistema de Informações Geográficas SPRING, buscando a incorporação de práticas participativas no processo de mapeamento de 5 classes temáticas. A área de aplicação dos estudos de técnicas de classificação de imagens é a bacia hidrográfica do rio Caeté, localizada no município de Alfredo Wagner, na região sul das nascentes da bacia hidrográfica do Rio Itajaí, no Estado de Santa Catarina. De acordo com o objetivo proposto, a metodologia empregou duas técnicas de classificação digital de imagens, supervisionada MaxVer e não supervisionada IsoSeg, que foram comparadas por intermédio do índice de concordância Kappa com os resultados da interpretação visual, adotada como verdade terrestre. As técnicas de sensoriamento remoto utilizadas e os dados levantados em campo fundamentaram as classificações das imagens, permitindo conhecer e entender o contexto local. A metodologia adotada mostrou-se adequada para a delimitação das cinco classes temáticas propostas. As classes: mata, campo e reflorestamento foram as mais facilmente rotuladas, já as classes solo e cultivo, respectivamente, foram as que apresentaram maior complexidade na delimitação tanto digital quanto visual. A avaliação do desempenho das diferentes técnicas de classificação empregadas, por intermédio do índice de concordância Kappa, indicou que a qualidade das classificações digitais variou entre “boa” e “muito boa”; enquanto a classificação visual estabeleceu-se como sendo de “muito boa” a “excelente”. Quanto a exatidão global observou-se que todas as técnicas testadas superaram o índice de 80%, revelando relativa coerência e confiabilidade. Dentre os dois métodos empregados na classificação digital, o que apresentou resultados mais relevantes foi a técnica não supervisionada por regiões, com o algoritmo IsoSeg adotando os limiares de similaridade de 15 níveis de cinza, área mínima de 6 *pixels* e limiar de aceitação de 75%. Entretanto, considerando a variação entre os resultados obtidos por cada método de classificação, enfatiza-se dois aspectos: i) a escolha pela aplicação de determinada técnica decorre da classe temática de interesse, sendo que as vantagens e desvantagens de cada algoritmo devem ser localmente avaliadas, de acordo com as características da região em estudo; e, ii) a operação de filtragem deverá sempre ser aplicada com cautela, pois, apesar de suavizar as classes do mapa temático, reduz significativamente o valor da concordância Kappa ao generalizar as manchas de dimensões reduzidas.

**Palavras chaves:** uso e cobertura do solo, classificação de imagem, mapeamento temático, bacia hidrográfica.

## ABSTRACT

This work presents an evaluation of three techniques of soil use and cover mapping by digital processing images of Landsat-7, using the Geographical Information System SPRING (INPE), seeking to incorporate participatory practices. The study area is the Caeté River Basin, located in the county of Alfredo Wagner, on the sub-basin springs region of the river Itajaí do Sul, in Santa Catarina State. Two methodologies for digital classification techniques of images, supervised MaxVer and unsupervised IsoSeg, were compared by means of the Kappa index to visual interpretation. Five thematic classes were delimited; forest, pasture and reforestation were the easily labeled, soil and agriculture classes presented larger complexity both in digital and visual delimitation. The agreement index Kappa shows that the quality of the digital classifications varied between “good” and “very good”; while the visual classification was the “very good” for “excellent”. The global accuracy, in all the tested techniques, overcame the index of 80%, revealing relative coherence and reliability. The comparison of the two methods used in the digital classification indicates that the unsupervised technique by areas presented better results, because the algorithm IsoSeg adopted the similarity thresholds of 15 ash levels, minimum area of 6 pixels and acceptance threshold of 75%. However, considering the variation of results obtained by each classification method, two aspects have to be emphasized: i) the choice of a certain technical application elapses the focus on a specific thematic class; the advantages and disadvantages of each algorithm should be evaluated locally, in agreement with the characteristics of the study area. ii) the filter operation should be applied carefully, because in spite of softening the classes of the thematic map, it reduces the Kappa value when generalizing the stains of reduce dimensions.

**Keywords:** soil use and cover, images classification, thematic mapping, river basin.

## Sumário

<b><u>Epígrafe</u></b>	<b>iv</b>
<b><u>Dedicatória</u></b>	<b>v</b>
<b><u>Agradecimentos</u></b>	<b>vi</b>
<b><u>Resumo</u></b>	<b>vii</b>
<b><u>Abstract</u></b>	<b>viii</b>
<b><u>Sumário</u></b>	<b>ix</b>
<b><u>Índice de Figuras</u></b>	<b>xii</b>
<b><u>Índice de Tabelas</u></b>	<b>xiii</b>
<b><u>Lista de Anexos</u></b>	<b>xiv</b>
<b>Capítulo 1 – Apresentação</b>	<b>15</b>
1.1. <i>Introdução e Objetivos</i>	15
1.2. <i>Antecedentes da Pesquisa</i>	17
1.3. <i>Aproximação da Área</i>	19
1.4. <i>Estruturação da Pesquisa</i>	27
<b>Capítulo 2 – Revisão Bibliográfica</b>	<b>29</b>
2.1. <i>Sensoriamento Remoto</i>	29
2.1.1. Conceito	29
2.1.2. Princípios e Funcionamento	30
2.1.2.1. Radiação e Espectro Eletromagnético	30
2.1.2.2. Comportamento Espectral dos Alvos	33
2.1.2.2.1. Resposta Espectral do Solo	33
2.1.2.2.2. Resposta Espectral da Vegetação	33
2.1.2.2.3. Resposta Espectral da Água	35
2.1.3. Sistemas Sensores	36
2.1.3.1. Classificação dos Sistemas Sensores	37
2.1.3.2. O Sistema Landsat 7 do sensor ETM+	39
2.1.4. Resoluções	42
2.2. <i>Processamento Digital de Imagem</i>	43
2.2.1. Pré-Processamento	43
2.2.1.1. Correção Geométrica	43
2.2.1.1.1. Registro de Imagens	45
2.2.1.1.2. Reamostragem	46
2.2.1.2. Correção Radiométrica	48
2.2.1.2.1. Restauração da Imagem e Eliminação de Ruídos	49
2.2.1.2.2. Correção Atmosférica	50

2.2.2. Realce	51
2.2.2.1. Realce de Contraste	52
2.2.2.2. Transformações Multiespectrais	53
2.2.3. Classificação	55
2.2.3.1. Classificador MaxVer	58
2.2.3.1.1. Áreas de Treinamento	59
2.2.3.2. Classificador IsoSeg	60
2.2.3.3. Classificação Visual	62
2.2.4. Avaliação da Classificação	65
2.2.4.1 Coeficiente de Concordância Kappa	67
2.3. <i>Mapeamento Temático do “Uso e Cobertura do Solo” e Sistemas de Classificação</i>	69
2.3.1. Nomenclatura Utilizada	69
2.3.2. Sistemas de Classificação	71
2.3.3. Software SPRING	72
<b>Capítulo 3 – Materiais e Métodos</b>	<b>74</b>
3.1. <i>Materiais</i>	75
3.1.1. Fonte de Dados	75
3.1.2. Equipamentos	76
3.2. <i>Metodologia – Processamento Digital de Imagem</i>	77
3.2.1. Pré-Processamento	78
3.2.1.1. Correção Geométrica	78
3.2.1.1.1. Registro de Imagens	78
3.2.1.1.2. Reamostragem	79
3.2.1.2. Correção Radiométrica	79
3.2.1.2.1. Restauração da Imagem e Eliminação de Ruídos	80
3.2.1.2.2. Correção Atmosférica	80
3.2.2. Realce	80
3.2.2.1. Realce de Contraste	80
3.2.2.2. Transformações Multiespectrais	81
3.2.2.2.1. Razão entre Bandas	81
3.2.2.2.2. Composições de Bandas	81
3.2.2.2.3. Transformação IHS	81
3.2.3. Classificação	82
3.2.3.1. Classificador MaxVer	82
3.2.3.2. Classificador IsoSeg	83
3.2.3.3. Classificação Visual	84
3.2.3.4. Pós Classificação	84
3.2.4. Avaliação da Classificação	85
3.2.4.1 Coeficiente de Concordância Kappa	86

3.3. <i>Considerações Pertinentes</i>	86
3.3.1. A Escala de Trabalho	86
3.3.2. Época de Obtenção das Imagens	87
3.3.3. Tipo de Produto	88
3.3.4. Bandas Espectrais	90
3.3.5. Experiência do Fotointérprete	91
3.3.6. Definição da Legenda Temática	92
3.3.7. Levantamentos de Dados e Informações	95
<b>Capítulo 4 – Resultados e Discussões</b>	<b>99</b>
4.1. <i>Caracterização da Área</i>	99
4.1.2. Caracterização dos Índices Físicos	99
4.2. <i>Processamento Digital de Imagem</i>	104
4.2.1. Pré-Processamento	107
4.2.1.1. Correção Geométrica	107
4.2.1.1.1. Registro de Imagens	108
4.2.1.1.2. Reamostragem	110
4.2.1.2. Correção Radiométrica	111
4.2.1.2.1. Restauração da Imagem e Eliminação de Ruídos	111
4.2.1.2.2. Correção Atmosférica	114
4.2.2. Realce	114
4.2.2.1. Realce de Contraste	115
4.2.2.2. Transformações Multiespectrais	117
4.2.2.2.1. Razão entre Bandas	118
4.2.2.2.2. Composições de Bandas	119
4.2.2.2.3. Transformação IHS	121
4.2.3. Classificação	122
4.2.3.1. Classificador MaxVer	125
4.2.3.1.1. Áreas de Treinamento	125
4.2.3.1.2. Limiar de Aceitação	126
4.2.3.2. Classificador IsoSeg	130
4.2.3.2.1. Segmentação	130
4.2.3.2.2. O Limiar de Aceitação e a Classificação Temática	133
4.2.3.3. Classificação Visual	137
4.2.3.4. Pós Classificação	140
4.2.4. Avaliação da Classificação	141
4.2.4.1 Coeficiente de Concordância Kappa	147
<b>Capítulo 5 – Considerações Finais</b>	<b>157</b>
<b>Referências Bibliográficas</b>	<b>163</b>

## Índice de Figuras

Figura 1 – Localização da Unidade da Federação. a) 1 : 100.000.000 b) 1 : 10.000.000. ....	19
Figura 2 – Contexto municipal, escala 1 : 1.000.000. ....	19
Figura 3 – Regiões Hidrográficas de Alfredo Wagner, escala 1 : 1.000.000. ....	20
Figura 4 – Dois sistemas de drenagem, vertentes do interior e atlântica.....	20
Figura 5 – As três grandes bacias do Estado sobrepostas a altimetria. ....	21
Figura 6 – Regiões hidrográficas de Santa Catarina.....	21
Figura 7 – Associações de Município.....	23
Figura 8 – Número de ocorrências de enchentes, 1980/1995.....	23
Figura 9 – Mesorregiões e Microrregiões.....	25
Figura 10 – Gerências Regionais vinculadas à Epagri. ....	26
Figura 11 – Unidades de Planejamento Regional adotadas pela Epagri. ....	26
Figura 12 – Secretarias de Desenvolvimento Regional do Estado de Santa Catarina.....	26
Figura 13 – Espectro Eletromagnético. ....	31
Figura 14 – Partes componentes de um sistema sensor.....	36
Figura 15 – Classificação dos sistemas. ....	37
Figura 16 – Satélite Landsat-7.....	39
Figura 17 – Sensor ETM <sup>+</sup> do satélite Landsat-7.....	39
Figura 18 – Registro da imagem de ajuste ao mapa de referência. ....	45
Figura 19 – Fluxograma da pesquisa.....	75
Figura 20 – Sub-bacias da RH7.....	99
Figura 21 – Área de Drenagem da Represa de Ituporanga.....	100
Figura 22 – Sub-bacias formadoras do Itajaí do Sul e Microbacias do Caeté.....	100
Figura 23 – Distribuição da Declividade, a) Barragem Sul b) Nascente Sul. ....	102
Figura 24 – Distribuição da Declividade, sub-bacia do Caeté. ....	102
Figura 25 – Distribuição da Declividade: Microbacia do a) Santo Anjo b) Perito. ....	103
Figura 26 – Curva Hipsométrica, a) Barragem Sul b) Microbacia do Perito. ....	103
Figura 27 – Perfil Longitudinal do Rio Caeté e formadores. ....	103
Figura 28 – Distribuição dos níveis de cinza. a) Banda 3 e b) Banda 4. ....	105
Figura 29 – Distribuição dos níveis de cinza. a) Banda 5 e b) Banda 8. ....	105
Figura 30 – Valores de Média, Mediana e Moda para as bandas do ETM <sup>+</sup> . ....	106
Figura 31 – Valor Máximo, Mínimo e Média para as bandas do ETM <sup>+</sup> . ....	106
Figura 32 – Transformação polinomial de: a) 1 <sup>a</sup> ordem b) 2 <sup>a</sup> ordem c) 3 <sup>a</sup> ordem.....	109
Figura 33 – Banda 8 (pancromática) sem filtragem linear. ....	112
Figura 34 – Banda 8 (pancromática) com filtragem linear do tipo <i>passa-baixa</i> (3 x 3). ....	113
Figura 35 – Banda 8 (pancromática). a) sem filtro e b) com filtro <i>passa-baixa</i> (3x3).....	113
Figura 36 – Microbacia do Santo Anjo, imagem com pré-processamento aplicado.....	116
Figura 37 – Sub-bacia do Caeté, bandas pré-processadas e realçadas. ....	117
Figura 38 – Razão entre as bandas 4 e 5, com fator de ganho 25 e <i>offset</i> 50. ....	119

Figura 39 – Transformação RGB-IHS e IHS-RGB.....	121
Figura 40 – Resposta espectral média das classes temáticas.....	123
Figura 41 – Resultados da classificação temática; aceitação de 90%. .....	127
Figura 42 – Resultados da classificação temática; aceitação de 95%. .....	127
Figura 43 – Mapa gerado pelo algoritmo MaxVer, pós classificado.....	129
Figura 44 – Imagem rotulada (regiões segmentadas) sobreposta a composição 453.....	132
Figura 45 – Imagem classificada com aceitação de 75%. .....	134
Figura 46 – Imagem classificada com aceitação de 99%. .....	134
Figura 47 – Mapa gerado pelo algoritmo IsoSeg, pós classificado. ....	136
Figura 48 – Mapa gerado pelo algoritmo IsoSeg, pós classificado. ....	139
Figura 49 – Comparativo entre percentual de áreas classificadas em cada tema. ....	142
Figura 50 – Área classificada para cada classe em cada técnica. ....	142
Figura 51 – Síntese dos valores do índice Kappa obtidos para as classificações digitais. ....	152

## Índice de Tabelas

Tabela 1 – Características gerais a RH7.	22
Tabela 2 – Municípios com ocorrência de enchentes mais severas.	23
Tabela 3 – Participação da produção agrícola por produto e por região hidrográfica.	24
Tabela 4 – Características espectrais e espaciais do sensor ETM <sup>+</sup> do Landsat-7.	40
Tabela 5 – Principais aplicações do sensor EMT <sup>+</sup> em função da faixa espectral.	42
Tabela 6 – Matriz de erro ou matriz de confusão.	65
Tabela 7 – Exemplo numérico da exatidão do produtor e do usuário.	66
Tabela 8 – Conceitos do Coeficiente Kappa.	68
Tabela 9 – Fluxograma das etapas para a classificação temática.	77
Tabela 10 – Classe temática e cor de representação na legenda temática.	94
Tabela 11 – Síntese dos Índices Físicos (referência 1:50.000).	101
Tabela 12 – Síntese das informações estatísticas.	106
Tabela 13 – Matriz de Correlação das bandas 1 a 5 e 7 do Landsat-7 ETM <sup>+</sup> .	107
Tabela 14 – Matriz de Co-Variância das bandas 1 a 5 e 7 do Landsat-7 ETM <sup>+</sup> .	107
Tabela 15 – Estimativa do EMQ resultante do registro da imagem.	109
Tabela 16 – Comportamento Radiométrico das Classes Temáticas.	122
Tabela 17 – Características das Classes Temáticas.	123
Tabela 18 – Distribuição das regiões utilizadas na classificação das bandas 3, 4 e 5.	126
Tabela 19 – Estatísticas da classificação supervisionada pelo algoritmo MaxVer.	128
Tabela 20 – Espaço de Combinações dos limiares de similaridade e área.	131
Tabela 21 – Combinações de Limiares utilizados no processo de segmentação.	131
Tabela 22 – Número de regiões obtidos da extração de regiões.	132
Tabela 23 – Distribuição das regiões (áreas de treinamento).	133
Tabela 24 – Estatísticas da classificação não supervisionada pelo algoritmo IsoSeg.	135
Tabela 25 – Estatísticas da classificação visual.	138

Tabela 26 – Média do número de <i>pixels</i> e número de polígonos por classe.	143
Tabela 27 – Comparativo entre a classificação visual e sua derivada filtrada.	144
Tabela 28 – Comparativo entre as classificações MaxVer, MaxVer <sub>filtro1</sub> e MaxVer <sub>filtro2</sub> .	144
Tabela 29 – Comparativo entre as classificações IsoSeg, IsoSeg <sub>filtro1</sub> e IsoSeg <sub>filtro2</sub> .	144
Tabela 30 – Distribuição do número de polígonos e respectivas áreas – Visual.	146
Tabela 31 – Distribuição do número de polígonos e respectivas áreas – MaxVer.	146
Tabela 32 – Distribuição do número de polígonos e respectivas áreas – IsoSeg.	147
Tabela 33 – Matriz de Erros da classificação Visual com 35 pontos.	148
Tabela 34 – Matriz de Erros da classificação Visual com 47 pontos.	149
Tabela 35 – Matriz de Erros da classificação MaxVer.	149
Tabela 36 – Matriz de Erros da classificação MaxVer <sub>filtro1</sub> .	150
Tabela 37 – Matriz de Erros da classificação MaxVer <sub>filtro2</sub> .	150
Tabela 38 – Matriz de Erros da classificação IsoSeg.	150
Tabela 39 – Matriz de Erros da classificação IsoSeg <sub>filtro1</sub> .	151
Tabela 40 – Matriz de Erros da classificação IsoSeg <sub>filtro2</sub> .	151
Tabela 41 – Classificação MaxVer, valores de exatidão e erro por classe.	153
Tabela 42 – Classificação MaxVer <sub>filtro1</sub> , valores de exatidão e erro por classe.	154
Tabela 43 – Classificação MaxVer <sub>filtro2</sub> , valores de exatidão e erro por classe.	154
Tabela 44 – Classificação IsoSeg, valores de exatidão e erro por classe.	154
Tabela 45 – Classificação IsoSeg <sub>filtro1</sub> , valores de exatidão e erro por classe.	154
Tabela 46 – Classificação IsoSeg <sub>filtro2</sub> , valores de exatidão e erro por classe.	155

## Lista de Anexos

Anexo I – Rotina de Cálculo em LEGAL, Correção dos Efeitos Atmosféricos
Anexo II – Rotina de Cálculo em LEGAL, Atenuação do Efeito Topográfico
Anexo III – Limiar de Similaridade (S) e de Área (A), Classes geradas na segmentação
Anexo IV – Tabulação Cruzada, 35 pontos X classificação visual
Anexo V – Tabulação Cruzada, 47 pontos X classificação visual
Anexo VI – Composição colorida 4R-5G-3B, pontos para acurácia e pontos de registro
Anexo VII – Tabulação Cruzada, Classificação Visual X Classificação MaxVer
Anexo VIII – Tabulação Cruzada, Classificação Visual X Classificação IsoSeg
Anexo IX – Base Cartográfica da sub-bacia do Caeté (1 <sup>a</sup> versão)
Anexo X – Base Cartográfica com pontos de referência (2 <sup>a</sup> versão)
Anexo XI – Base Cartográfica com Composição Colorida 5R-4G-3B (3 <sup>a</sup> versão)
Anexo XII – Base Cartográfica com Composição Colorida 4R-5G-3B (4 <sup>a</sup> versão)
Anexo XIII – Base Cartográfica com pontos de referência (5 <sup>a</sup> versão)
Anexo XIV – Base Cartográfica, Composição Colorida 4R-5G-3B e Mapeamento Temático
Anexo XV – Resultados do Mapeamento Temático para a Classificação MaxVer <sub>filtro1</sub>
Anexo XVI – Resultados do Mapeamento Temático para a Classificação IsoSeg <sub>filtro1</sub>
Anexo XVII – Registros Fotográficos

# CAPÍTULO 1 – APRESENTAÇÃO

## 1.1. INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

Em trabalhos cujo enfoque é o planejamento de bacias hidrográficas, tem se verificado com mais intensidade, a incorporação e a aplicação do uso de sensores orbitais para a aquisição de informações temáticas sobre os objetos e fenômenos da superfície terrestre. As situações em que não ocorre o contato direto entre o sensor e os alvos encontram-se sob a denominação genérica de sensoriamento remoto. O sensoriamento remoto apresenta vantagens na conjugação da representação espacial de informações, uma vez que registra dados temporais de uma determinada região sem danificar ou interferir o ecossistema, utilizando as propriedades da energia eletromagnética.

Os produtos do sensoriamento remoto orbital, na grande maioria, são disponibilizados sob a forma de imagens digitais que registram informações passíveis de interpretação pelo usuário. O potencial desta tecnologia reside na possibilidade de levantamento e atualização de objetos ou padrões de uma cena, além da periodicidade inerente dos sistemas orbitais. Como resultado é possível extrair, por exemplo, uma imagem simplificada contendo apenas as informações de interesse específico, como os tipos de desmatamento e reflorestamento; ou ainda, mensurar algum atributo específico da cena, como área e porcentagem de cobertura de determinado cultivo.

Neste sentido, a pesquisa aqui apresentada busca *analisar o mapeamento temático do uso e cobertura do solo*, a partir do emprego de técnicas de classificação de imagens orbitais. Como fonte de dados são empregadas imagens do satélite Landsat 7 ETM<sup>+</sup> associadas à base cartográfica, além de levantamentos expedidos em campo visando verificar e validar as informações processadas em meio digital. A análise e interpretação das imagens são realizadas por intermédio do aplicativo SPRING, um *software* de domínio público, desenvolvido pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE).

A área de estudo está situada em umas das três principais nascentes do rio Itajaí do Sul, no município de Alfredo Wagner, no Estado de Santa Catarina, contemplando especificamente a microbacia hidrográfica do rio Caeté. Tal microbacia pode ser considerada

predominantemente rural, sendo o uso das terras basicamente representado pelas classes de agricultura (cultivo de cebola e milho) e pastagem, a cobertura das terras é caracterizada pela silvicultura (espécie florestal *pinnus ellioti ssp.*), mata atlântica e a vegetação em diferentes estágios de regeneração.

O rio Caeté é o manancial que abastece a sede urbana do município e está seriamente comprometido, em virtude da ocupação desordenada e irregular do solo, com moradias e lavouras ao longo de áreas ribeirinhas e também, devido ao não cumprimento da legislação quanto ao uso do solo e de uma política que contemple a recuperação das matas ciliares. Uma das conseqüências mais visíveis e prováveis é a intensificação da freqüência e amplitude das enchentes na região (ALMEIDA *et al.* 2003).

O objetivo geral deste estudo é “realizar uma caracterização dos índices físicos da microbacia do rio Caeté quanto ao uso e cobertura do solo por intermédio de mapeamento temático, visando à produção de informações cartográficas destinadas a aplicação em modelos de erosão hídrica”. Para tanto, este objetivo subdivide-se em dois outros, a saber, “aplicar diferentes técnicas de classificação de imagens orbitais do satélite Landsat 7 ETM<sup>+</sup> em ambiente SIG, empregando o aplicativo SPRING<sup>®</sup> (INPE)”; e “comparar as técnicas de classificação de imagens por região e *pixel a pixel* com a interpretação visual”. Como objetivo último, pretende-se “recomendar a técnica de classificação de imagens mais apropriada de acordo com a análise da concordância, a partir da tabulação cruzada, mediante a avaliação do índice Kappa”.

A finalidade do trabalho é oferecer elementos para futuras aplicações na modelagem da erosão hídrica e na produção de uma proposta de zoneamento adequado do solo, utilizando simulações e modelagens da perda do solo. Este zoneamento do potencial erosivo, somado às condições socioeconômicas, poderão constituir a base para um zoneamento ambiental desta microbacia hidrográfica, conciliando alternativas de culturas adequadas às características locais e delimitando áreas onde, mesmo que sejam realizadas atividades agrícolas, deve prevalecer o convívio harmônico do homem com as cheias dos corpos hídricos.

O mapeamento temático do uso e cobertura do solo proposto nesta pesquisa ganha relevância quando generaliza e simplifica uma situação complexa, facilitando a compreensão das relações intrínsecas entre o homem e ecossistemas naturais, possibilitando assim, agregar conhecimentos nos estudos e possíveis ações de prevenção de enchentes e inundações a partir do planejamento do uso dos recursos hídricos.

## 1.2. ANTECEDENTES DA PESQUISA

Diversos trabalhos acadêmicos têm como área de estudo o município de Alfredo Wagner, localizado na cabeceira sul da bacia hidrográfica do rio Itajaí. Os trabalhos são aqui categorizados em dois momentos, a saber: o primeiro momento remete às publicações de SACHET *et al.* (1994)<sup>1</sup> onde constam informações das classes de aptidão de uso das terras além de recomendações de uso e manejo para a microbacia hidrográfica do Caeté, e MONEGAT (1994)<sup>2</sup>, que enfatiza ser a prática de pousio/queima uma séria ameaça ao sistema de produção de cebola nesta mesma bacia hidrográfica.

O segundo momento, no qual se insere o presente trabalho, refere-se às pesquisas iniciadas a partir do ano de 2001, por intermédio do Núcleo de Estudos da Água (NEA), que abrangem todo o município de Alfredo Wagner.

O início das pesquisas é representado pelo projeto “*Controle de Enchentes e Gestão Ambiental Participativa*” (POMPÊO, 2004), financiado pelo CNPq durante os anos de 2001 e 2002. As principais características das pesquisas são a **sustentabilidade** e a **participação**. A primeira desenvolve-se em torno do tema gerador água, contemplando a caracterização, descrição e quantificação de processos físicos, como erosão, enchentes e qualidade das águas, o estudo da gênese da degradação dos recursos naturais, derivada da apropriação social destes recursos. A participação é representada pelo reconhecimento dos sujeitos sociais na reflexão e discussão destas questões, por meio de processos de pesquisa participante.

Significativo neste processo foi a realização do “*I Fórum Municipal de Desenvolvimento e Meio Ambiente, Alfredo Wagner (SC)*” em agosto de 2002, que reuniu mais de 350 pessoas em nove oficinas para discussão dos grandes problemas ambientais do município.

Com suporte financeiro da FINEP iniciou-se em 2003 o projeto de pesquisa “*Planejamento Participativo de Recursos Hídricos na Região das Nascentes do Rio Itajaí do Sul*” (POMPÊO *et al.* 2003), incluindo-se então 11 metas físicas, e abrangendo desde estudos relativos a enchentes e inundações, erosão e transporte de sedimentos, saneamento e qualidade das águas, e avançando até estudos de integração metodológica e avaliação de ações coletivas de pesquisa.

---

<sup>1</sup> “Levantamento Edafoclimático da microbacia do rio Caeté, município de Alfredo Wagner”.

<sup>2</sup> “Sustentabilidade do sistema de produção da cebola, sob cultivo com a prática do pousio/queima, na microbacia hidrográfica do rio Caeté, município de Alfredo Wagner-SC”.

Neste contexto, destacam-se os trabalhos de graduação de: VIECILI (2002), SOUTO (2003), STEINWANDTER (2004); além das dissertações de SEIBT (2002), ALMEIDA (2003), SCHMITZ (2003), MASSON (2004), CHECCHIA (2005) e MENDONÇA (2005) todas vinculadas ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Ambiental (PPGEA/UFSC).

Dentre estes, Viecili (2002), em *“Cartografia Digital para a Gestão Ambiental”*, realizou a conversão da base cartográfica, do município de Alfredo Wagner, para o meio digital na escala 1:50.000 através de técnicas de vetorização, disponibilizando uma base de dados referenciada que vêm sendo utilizada nas atividades de pesquisa neste município. Já Souto (2003), no trabalho *“Definição das regiões mais carentes à criação de unidades de conservação em Alfredo Wagner através de técnicas de geoprocessamento”*, delimitou as Áreas de Proteção Ambiental (APPs) deste município de posse da base cartográfica em meio digital, por intermédio de técnicas de geoprocessamento, a autora identificou 428 km<sup>2</sup> (referente a 59% da área do município) como sendo APPs, para a escala utilizada, estabelecidas segundo critérios previstos no Código Florestal/1965, Lei n<sup>o</sup>. 4.771/65 e Lei n<sup>o</sup>. 7.511/86.

O trabalho de Seibt (2002), *“As práticas rurais, a água e o processo participativo no município de Alfredo Wagner/SC”* teve como objetivo “a reflexão coletiva da realidade rural e a sua perspectiva, sob o contexto sociocultural, econômico e ecológico e a organização comunitária, visando o planejamento de ações que promova o desenvolvimento rural sustentável”. Dentre as conclusões, o autor aponta a potencialidade das comunidades para discussão e reflexão coletiva sobre os problemas locais, a exemplo do “I Fórum Municipal de Desenvolvimento e Meio Ambiente” do município.

Já Almeida (2003), na pesquisa “Processo histórico de uso e ocupação do solo e suas repercussões nos recursos hídricos no Município de Alfredo Wagner/SC: um processo interdisciplinar e de construção participativa local”, empreende, juntamente com um grupo de pesquisadores locais, uma reflexão sobre a reversão da degradação ao longo dos eixos hídricos a partir de conceitos sobre leitura da paisagem.

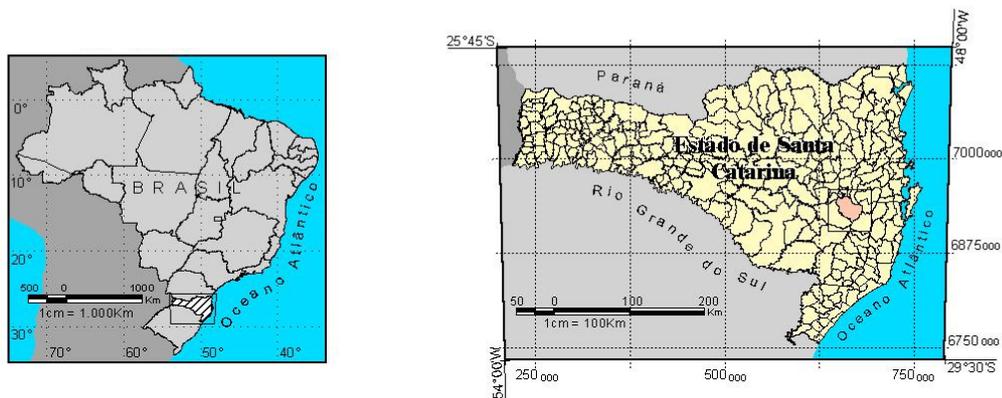
Schmitz (2003), na dissertação “Olhares e Trajetórias na Educação: entrecruzando saberes interdisciplinares e práticas pedagógicas no município de Alfredo Wagner”, aponta as grandes distâncias entre os métodos e ritmos empregados pela rede municipal de ensino e a realidade dos habitantes do município, apontando à necessidade de uma prática educativa contextualizada, capaz de permitir diálogos entre saberes.

Masson (2004), no trabalho *“A Gestão Ambiental Participativa: possibilidades e limites de um processo de múltiplas relações”*, analisa as ações integradoras realizadas no

âmbito do processo de gestão ambiental participativa desenvolvido pela UFSC no município de Alfredo Wagner.

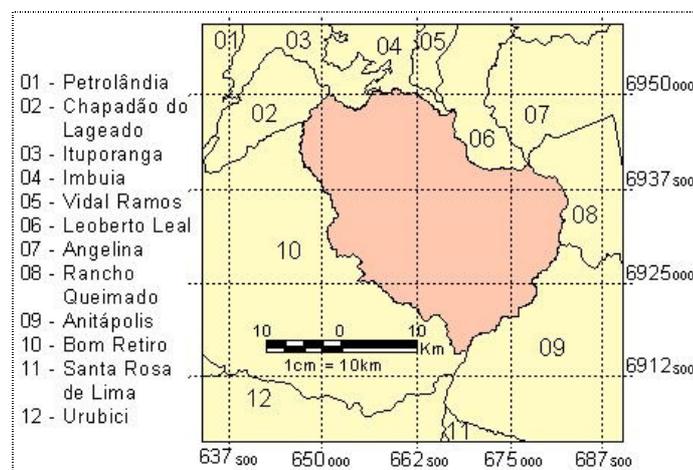
### 1.3. APROXIMAÇÃO DA ÁREA

Para compreender as relações existentes entre as instituições atuantes e as unidades político-administrativas que envolvem a área de estudo, é apresentada a aproximação geográfica desta área. Localizado na região sul do Brasil, no Estado de Santa Catarina (Figura 1), o município de Alfredo Wagner (Figura 2) limita-se ao norte pelos municípios de Chapadão do Lageado, Imbuia, Ituporanga e Leoberto Leal, ao sul por Anitápolis e Bom Retiro, a leste por Anitápolis e Rancho Queimado e a oeste pelo município de Bom Retiro. Considerando os aspectos naturais do relevo e sociais das comunidades, o município de Alfredo Wagner, é dividido em 14 (quatorze) regiões hidrográficas (Figura 3), delimitadas pelo Escritório Local da Epagri no âmbito do Projeto Microbacias II. A área de estudo do presente trabalho é destacada na Figura 3.



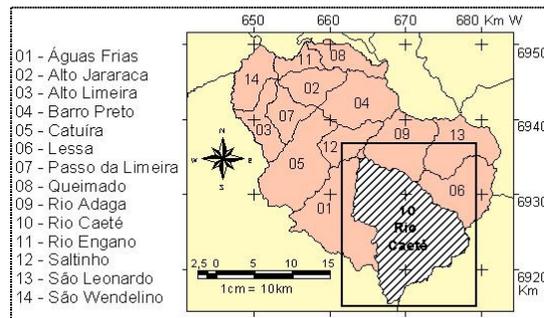
Fonte: Elaboração do autor.

**Figura 1 – Localização da Unidade da Federação. a) 1 : 100.000.000 b) 1 : 10.000.000.**



Fonte: Elaboração do autor.

**Figura 2 – Contexto municipal, escala 1 : 1.000.000.**

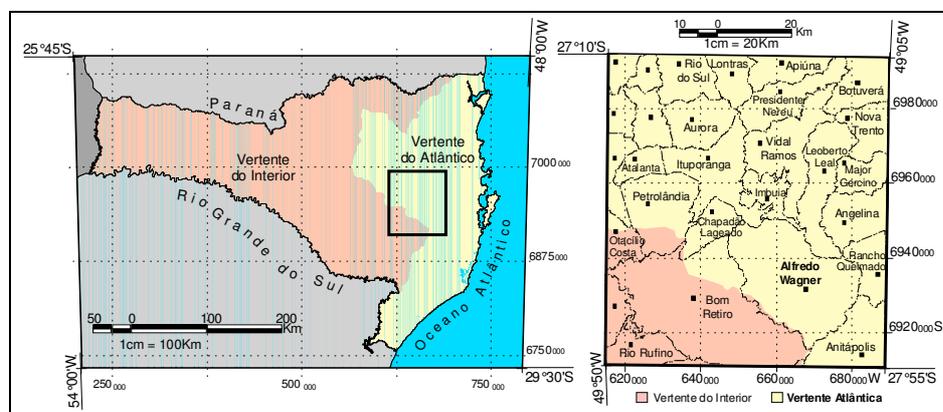


Fonte: Elaboração do autor.

**Figura 3 – Regiões Hidrográficas de Alfredo Wagner, escala 1 : 1.000.000.**

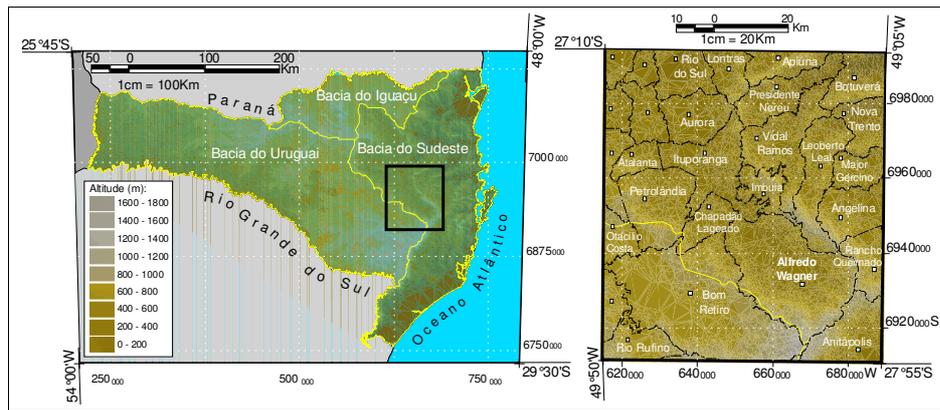
As divisões regionais, inseridas no contexto estadual, permitem ampla análise dos aspectos geográficos e hidrográficos envolvendo o município de Alfredo Wagner e a sub-bacia do Caeté. A partir da base cartográfica digital de SANTA CATARINA (2000b) e da divisão territorial dos municípios do Estado, alguns aspectos característicos são apresentados.

Neste sentido, a Figura 4 ilustra os dois sistemas independentes de drenagem, descritos no Diagnóstico Geral das Bacias Hidrográficas de Santa Catarina (SANTA CATARINA, 1997). A oeste tem-se o Sistema Integrado da Vertente do Interior, comandado pela bacia Paraná-Uruguai e a leste Sistema da Vertente Atlântica, formado por um conjunto de bacias isoladas, drenadas diretamente no Oceano Atlântico. Estas duas vertentes de drenagem contemplam três grandes bacias: as bacias do Uruguai e do Iguaçu (vertente do interior) e a bacia do Sudeste (vertente atlântica), que estão sobrepostas às informações do relevo na Figura 5. As bacias hidrográficas da vertente atlântica apresentam áreas de drenagem relativamente pequenas, se comparadas com outras bacias brasileiras (SANTA CATARINA, 1999). Segundo esta fonte, a exceção fica por conta da bacia do rio Itajaí, que apresenta uma área três vezes superior às demais bacias da vertente atlântica do Estado de Santa Catarina e tem seus formadores em regiões mais elevadas, razão pela qual seus deflúvios atingem a parte baixa da bacia com bastante rapidez.



Fonte: Elaboração do autor.

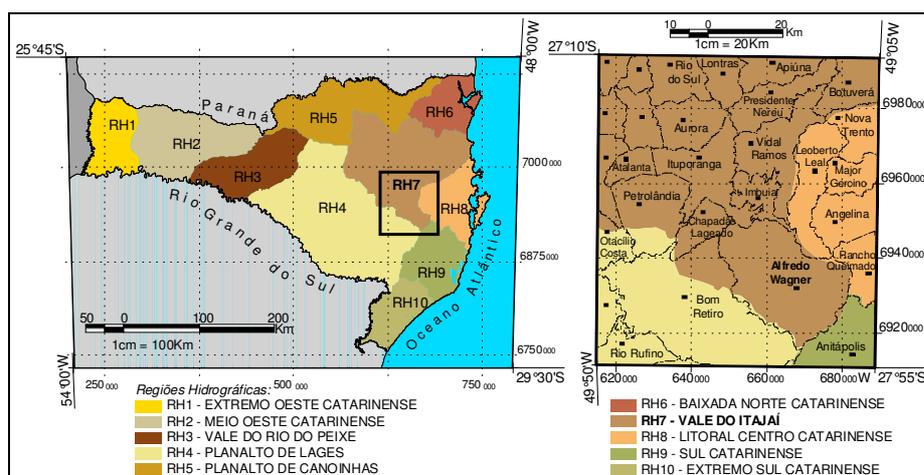
**Figura 4 – Dois sistemas de drenagem, vertentes do interior e atlântica.**



Fonte: Elaboração do autor.

**Figura 5 – As três grandes bacias do Estado sobrepostas a altimetria.**

SANTA CATARINA (2000b) divide o Estado de Santa Catarina, de acordo com as características: físicas (geomorfologia, geologia, hidrologia, relevo, solo, etc.); geográficas (área, divisão municipal, divisão de bacias); sócio-econômicas (população, atividades econômicas, estrutura fundiária); associativas (associações de municípios) e municipais (número de municípios existentes), em dez regiões hidrográficas (RH's) (Figura 6) e 25 bacias hidrográficas<sup>3</sup>. Das dez RH's, cinco estão inseridas na Bacia do Sudeste (Vertente Atlântica), destacando-se a RH7 (Região Hidrográfica do Vale do Itajaí), pelo expressivo número de municípios, população total residente, número de indústrias e área de drenagem. A área da RH7 corresponde à 15.111 Km<sup>2</sup>, representando aproximadamente 15% da extensão territorial catarinense, sendo a maior bacia e região hidrográfica do Estado. Alguns aspectos relevantes, característicos da RH7, estão sintetizados na Tabela 1.



Fonte: Elaboração do autor.

**Figura 6 – Regiões hidrográficas de Santa Catarina.**

<sup>3</sup> A caracterização do estado em dez regiões hidrográficas é detalhada na Lei Estadual 10.949, de 09/11/1998.

**Tabela 1 – Características gerais a RH7.**

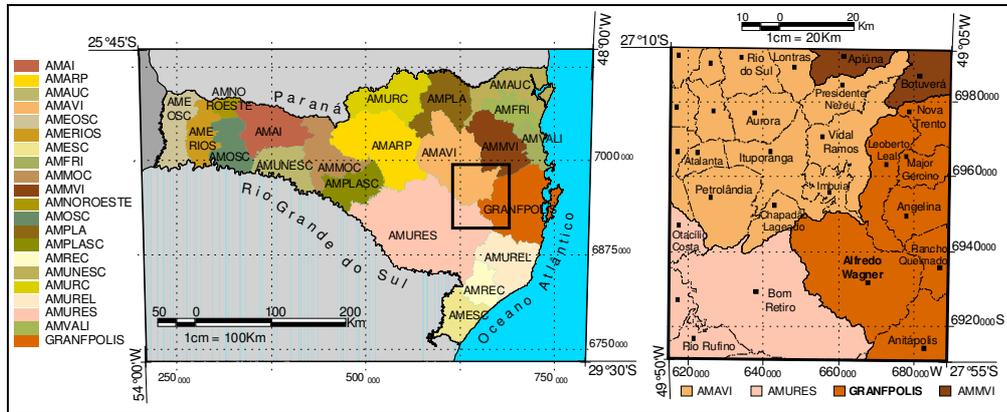
Área	Km <sup>2</sup>	15.111
População total	Hab	920.023
População rural	Hab	232.245
Densidade demográfica	Hab/Km <sup>2</sup>	60.9
Número de municípios	Número	51
Consumo urbano total	m <sup>2</sup> /mês	4.822.132
Consumo urbano médio	Litros/hab/dia	202
Número de irrigantes	Número	4.046
Consumo em irrigação	m <sup>2</sup> /dia	2.963.275
Número de poços profundos	Número	48
Número de indústrias	Número	3.398

Fonte: Santa Catarina (1997).

De acordo com COMITÊ ITAJAÍ (2004), a bacia do Itajaí congrega 47 municípios inteiramente inclusos, além de englobar parcialmente os municípios de Bom Retiro, Itaiópolis, Papanduva, Monte Castelo e Massaranduba, cujas sedes se encontram fora da bacia. Para o Comitê Itajaí (2004), politicamente, a bacia do Itajaí é dividida em três regiões, representadas pelas Associações de Municípios AMAVI, AMMVI e AMFRI. Entretanto, destaca que nem todos os municípios localizados na bacia estão vinculados à estas três Associações de Municípios. É o caso de Alfredo Wagner, localizado na extremidade sul da bacia e vinculado à Associação dos Municípios da Grande Florianópolis (Figura 7).

De acordo com Santa Catarina (1997), das bacias litorâneas, a do rio Itajaí é que está mais sujeita ao problema de danos por enchentes. O grande número de cursos fluviais, alimentados pelas abundantes precipitações durante todo o ano, freqüentemente têm produzido inundações com prejuízos, particularmente nos centros urbanos da região (Santa Catarina, 1997). Neste sentido, HERMANN citado em Santa Catarina (1997), evidencia o número de ocorrências de enchentes na bacia do Itajaí ao longo dos anos. Neste estudo são três níveis de ocorrência de enchentes de acordo com a intensidade, têm-se: 1) enchente com calamidade pública, 2) enchente parcial com desabrigados e 3) enchente parcial. A análise específica para a RH7 indica a maior ocorrência para o nível 1 (enchente com calamidade pública) nos municípios de Alfredo Wagner, Blumenau e Navegantes com quatro eventos de maior impacto no período analisado, seguido pelos municípios de Benedito Novo, Gaspar, Laurentino, Leoberto Leal, Rio dos Cedros, Rio do Oeste e Timbó com três eventos do nível 1. A Tabela 2, adaptada dos estudos de HERMANN citada em Santa Catarina (1997), indica o mês e ano de ocorrência de enchentes com perdas significativas na região e o seu nível de gravidade, por município, caracterizando a freqüência e o grau de intensidade sobre as populações atingidas no período compreendido entre 1980 e 1995. No contexto de representação espacial, a Figura 8 ilustra temporalmente o número de ocorrências de enchentes para a bacia do Itajaí. Nesta

observa-se a maior probabilidade de ocorrência de enchentes (mais de duas em cinco anos) dentre as possíveis, para parte da área de estudo, bem como para o município de Alfredo Wagner.



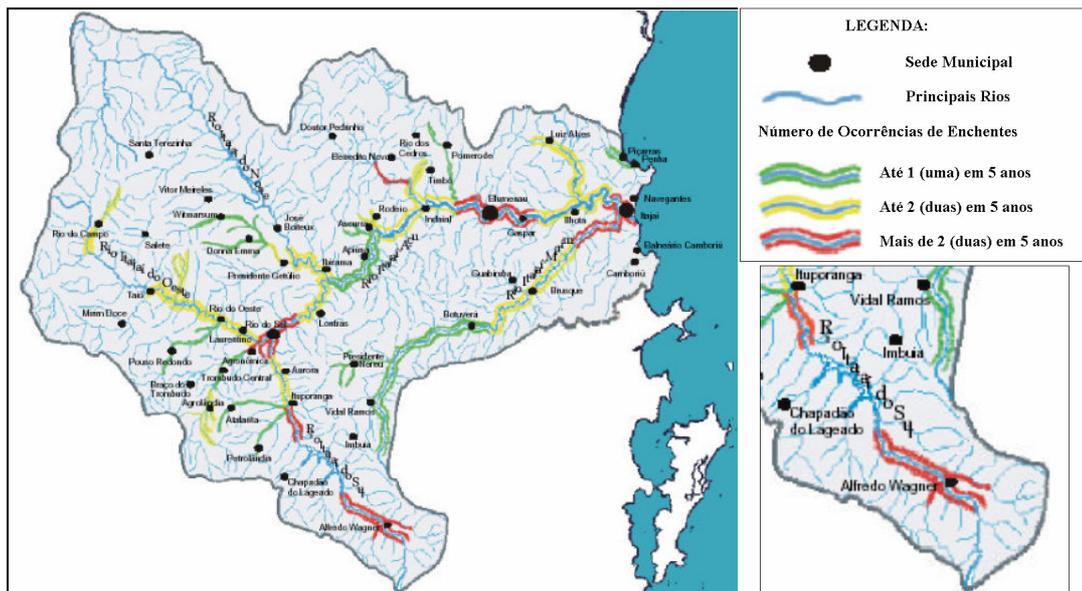
Fonte: Elaboração do autor.

**Figura 7 – Associações de Município.**

**Tabela 2 – Municípios com ocorrência de enchentes mais severas.**

Município	Enchentes – mês e ano de ocorrência		
	Com Calamidade Pública	Parcial Com Desabrigados	Enchente Parcial
Alfredo Wagner	7/83 - 8/84 7/93 - 5/94	5/87 - 5/92 - 1/95	7/82
Blumenau	7/83 - 12/83 8/84 - 10/90	1/83 - 5/83 - 1/92 5/92 - 1/95	3/80 - 7/80 - 10/80 2/82 2/84 - 9/89 2/91 - 11/91
Navegantes	7/83 - 3/92 5/92 - 5/94	8/84	2/87

Fonte: HERMANN citado por Santa Catarina (1997).



Nota: Adaptada de HERMANN citado por Santa Catarina (1997).

**Figura 8 – Número de ocorrências de enchentes, 1980/1995.**

Apesar das freqüentes e intensas enchentes na RH7, SEIBT (2002) destaca que a bacia do Itajaí cumpre importante papel no desenvolvimento econômico e social, e serve para abastecimento de água à população, à indústria e à agricultura dos municípios. Santa Catarina (1997) destaca que as atividades na RH7 são expressivas nos três setores da economia: agricultura, indústria e comércio. Relevante no presente estudo, a produção agrícola por produto e por região hidrográfica é descrita na Tabela 3.

**Tabela 3 – Participação da produção agrícola por produto e por região hidrográfica.**

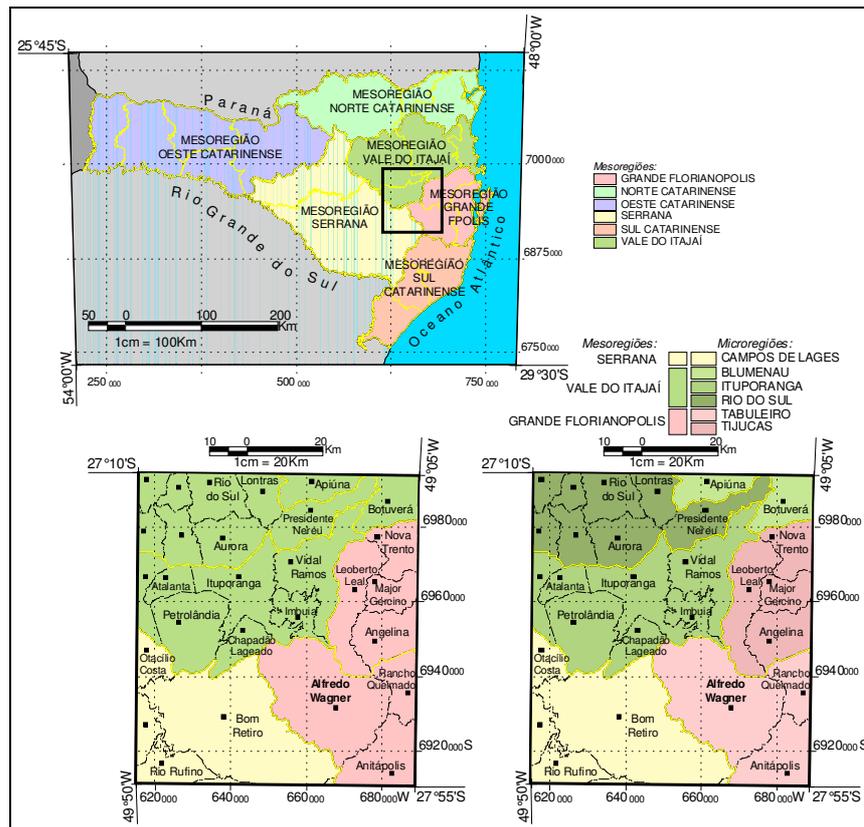
Região Hidrográfica	MILHO	FEIJÃO	FUMO	ARROZ	CEBOLA
RH1 – Extremo Oeste	916.427	55.647	16.403	-	-
RH2 – Meio Oeste	1.090.269	114.086	5.681	-	-
RH3 – Vale do Rio do Peixe	700.450	33.152	3.184	-	-
RH4 – Planalto de Lages	225.715	-	-	-	-
RH5 – Planalto de Canoinhas	341.680	17.465	24.075	-	-
RH6 – Baixada Norte Catarinense	14.812	-	-	130.639	-
<b>RH7 – Vale do Rio Itajaí</b>	<b>194.198</b>	<b>9.093</b>	<b>38.191</b>	<b>127.360</b>	<b>201.559</b>
RH8 – Litoral Centro	25.224	2.474	4.933	13.509	-
RH9 – Litoral Sul	46.716	7.331	17.201	87.632	-
RH10 – Extremo Sul Catarinense	87.557	13.598	23.722	301.859	-
<b>SANTA CATARINA</b>	<b>3.643.048</b>	<b>252.846</b>	<b>133.390</b>	<b>660.999</b>	<b>201.599</b>

Nota: Valores em tonelada (t). Fonte: Santa Catarina (1997).

As divisões regionais, em seus diferentes níveis, constituem parte da missão institucional do IBGE e têm a finalidade básica de subsidiar o levantamento e a divulgação de dados estatísticos (IBGE 2000). Delimitada a unidade da federação (Figura 1), no primeiro nível de divisão regional adotado pelo IBGE (2000) estão as Mesorregiões Geográficas e no segundo nível as Microrregiões Geográficas (Figura 9). Para Santa Catarina são 6 as mesorregiões<sup>4</sup> que subdividem-se 20 microrregiões, as quais são formadas pelos municípios e, estes pelos distritos. No caso de Alfredo Wagner, são definidos três distritos<sup>5</sup> que determinam as menores unidades de coleta de informações censitárias. Assim, além dos dados disponibilizados em nível municipal, é possível obter informações específicas para os três distritos do município. Entretanto, a área de estudo está agregada ao distrito Sede de Alfredo Wagner, juntamente com outras microbacias, restringindo a análise ao nível municipal.

<sup>4</sup> Mesorregião Grande Florianópolis, Mesorregião Norte Catarinense, Mesorregião Oeste Catarinense, Mesorregião Serrana, Mesorregião Sul Catarinense e Mesorregião do Vale do Itajaí.

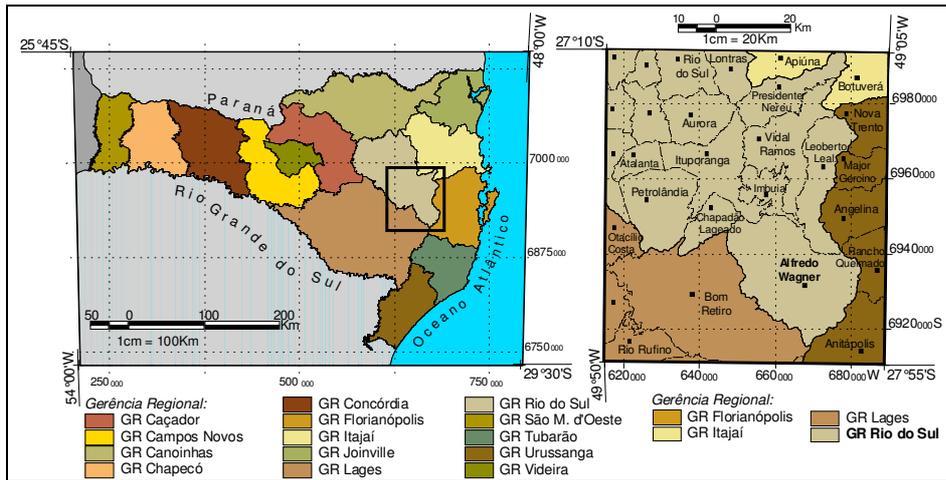
<sup>5</sup> Os três distritos são: Sede de Alfredo Wagner, Catuíra e São Leonardo.



Fonte: Elaboração do autor.

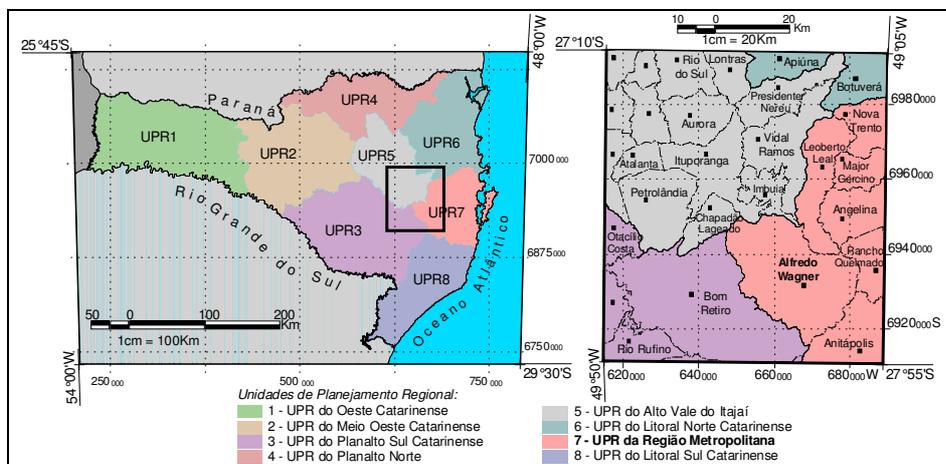
**Figura 9 – Mesorregiões e Microrregiões.**

A EPAGRI adota no Estado quatorze Gerências Regionais (Figura 10), caracterizando os limites políticos quanto aos aspectos administrativos. Relevantes ainda para área de estudo são o Centro de Treinamento de Agrônômica (CETRAG) e a Estação Experimental de Ituporanga, que estão vinculadas à Gerência Regional de Rio do Sul. Já a Gerência Regional de Florianópolis contribui com o Centro de Treinamento de Florianópolis (CETRE), o Centro de Referência em Pesquisa e Extensão Apícola (CEPEA) e o Centro Integrado de Informações de Recursos Ambientais de Santa Catarina (CIRAM). Além das gerências regionais a empresa considera, ainda para intervenção, oito Unidades de Planejamento Regional – UPR's – (Figura 11), designando os limites físicos adotados para o planejamento regional. O Governo do Estado de Santa Catarina, desde o ano de 2002, propõe 29 secretarias regionais de desenvolvimento como unidades administrativas descentralizadas para a gestão (Figura 12).



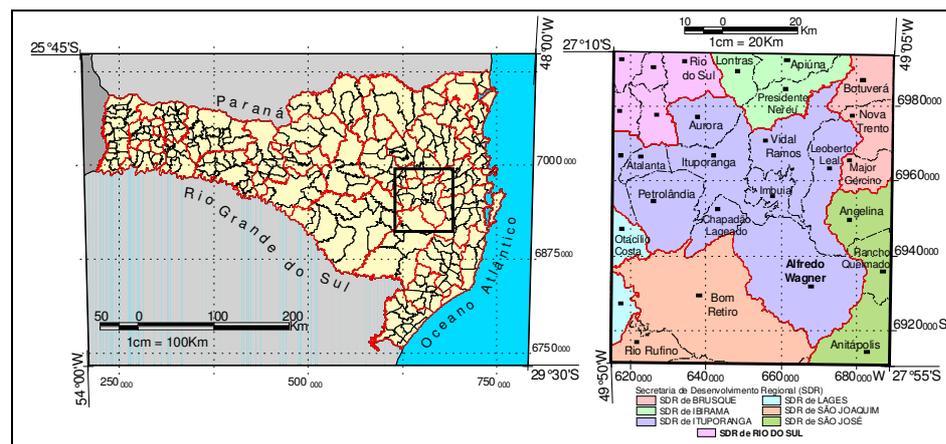
Fonte: Elaboração do autor.

**Figura 10 – Gerências Regionais vinculadas à Epagri.**



Fonte: Elaboração do autor.

**Figura 11 – Unidades de Planejamento Regional adotadas pela Epagri.**



Fonte: Elaboração do autor.

**Figura 12 – Secretarias de Desenvolvimento Regional do Estado de Santa Catarina.**

Do estudo específico da bacia do Itajaí e das divisões político-administrativas das instituições atuantes, observa-se, para a maioria dos casos analisados, não concordância entre limites.

Fato percebido na análise do município de Alfredo Wagner, que pertence naturalmente ao Vale do Itajaí, entretanto apresenta dados censitários registrados de acordo com a microrregião do Tabuleiro (mesorregião da Grande Florianópolis). Semelhante à esta situação observa-se, neste município, o desacordo entre a divisão institucional da Unidade de Planejamento Regional (UPR7-Região Metropolitana) adotada pela Epagri, em relação à divisão hidrográfica (RH7).

Por outro lado, apesar de pertencer à RH7, o município está inserido no contexto de atuação da Gerência Regional de Rio do Sul, sugerindo consonância entre a divisão institucional (Gerência Regional) e a conformação natural da RH7.

Observou-se, especificamente para o município em estudo, que as divisões territoriais utilizadas atualmente pelo IBGE não consideram, na totalidade, aspectos naturais na delimitação. No entanto, dentre as unidades institucionais adotadas no âmbito da esfera governamental, percebe-se, para o município de Alfredo Wagner, forte coerência entre a divisão da Secretaria de Desenvolvimento Regional de Ituporanga em relação ao limite físico natural da RH7.

A situação de menor concordância pôde ser percebida quando sobreposta a Associação de Municípios à região hidrográfica. Para o caso do município em estudo, notou-se que a Associação dos Municípios da Grande Florianópolis vincula-se mais fortemente as divisões territoriais do IBGE do que aos limites hidrográficos.

#### **1.4. ESTRUTURAÇÃO DA PESQUISA**

O *Capítulo 1 – Apresentação*, traz uma breve introdução relacionada a problemática ambiental percebida no município de Alfredo Wagner, especificamente no que refere-se a área da bacia do rio Caeté, além de abordar aspectos relacionados ao tema uso e cobertura do solo que justificam a realização desta pesquisa. Na introdução são numerados ainda os objetivos gerais e específicos desta pesquisa, seguindo uma aproximação da área de estudo e da presente estrutura da pesquisa.

Para o desenvolvimento deste trabalho faz-se necessário apresentar alguns conceitos e terminologias sobre os temas a serem abordados. Assim, o *Capítulo 2 – Revisão Bibliográfica*, contempla uma revisão conceitual de maneira didática e ordenada, abrangendo: Sensoriamento Remoto (item 2.1.); Processamento Digital de Imagens (item 2.2.); Mapeamento Temático do Uso e Cobertura do Solo e Sistemas de Classificação (item 2.3.). A sistematização de informações e conhecimentos nestes itens visa aproximar-se do panorama atual do tema de pesquisa tratado nesta.

No *Capítulo 3 – Materiais e Métodos*, são detalhados os materiais (item 3.1.), a metodologia (item 3.2.) e algumas considerações pertinentes (item 3.3.) à classificação temática proposta e aplicada. Destaca-se aqui a opção didática por uma estrutura repetitiva nos itens: da revisão bibliográfica (item 2.2.), da metodologia (item 3.2.) e dos resultados e discussões (item 4.2.) a fim propiciar uma seqüência lógica na construção e compreensão da pesquisa.

O *Capítulo 4 – Resultados e Discussões*, apresenta uma síntese das conclusões pertinentes, enfatizando os diferentes resultados obtidos por cada técnica de classificação, mantendo ainda a opção didática da estruturação do trabalho.

Por fim, o *Capítulo 5 – Considerações Finais*, expõe recomendações gerais do estudo e aspectos complementares à aplicação do processamento digital de imagens na classificação do uso e cobertura do solo. Apresenta, ainda, considerações referentes ao emprego de técnicas de pré-processamento, realce, classificação e avaliação no mapeamento temático.

## CAPÍTULO 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. SENSORIAMENTO REMOTO

#### 2.1.1. CONCEITO

INPE/DPI (2003a) apresenta duas definições para a tecnologia do Sensoriamento Remoto; uma mais simplista, quando diz que o Sensoriamento Remoto é a utilização de sensores para aquisição de informações sobre objetos ou fenômenos, sem que haja contato direto entre eles; e outra de cunho mais específico, porém bem mais abrangente, conceitua Sensoriamento Remoto como o conjunto das atividades relacionadas à aquisição e a análise de dados de sensores remotos.

Outra definição de Sensoriamento Remoto, bastante difundida no meio científico, é apresentada por NOVO (1989) ao expressar que o *"Sensoriamento Remoto consiste na utilização conjunta de modernos instrumentos (sensores), equipamentos para processamento e transmissão de dados e plataformas (aéreas ou espaciais) para carregar tais instrumentos e equipamentos, com o objetivo de estudar o ambiente terrestre através do registro e da análise das interações entre a radiação eletromagnética e as substâncias componentes do planeta Terra, em suas mais diversas manifestações"*. Entre os modernos instrumentos, comumente chamados de sensores, incluem-se as câmeras fotográficas, *scanners* mecânicos e sistemas radares, sejam eles aerotransportados (aviões, balões) ou orbitais (satélites).

FONSECA (2000) diz que o Sensoriamento Remoto é o processo de capturar informação sobre alguma coisa, sem estar em contato físico com ela: *aprendendo sem tocar*. Para a autora, a tecnologia de sensoriamento remoto por satélites está relacionada com as mais diversas disciplinas e tem representado um importante papel na construção do mundo em que vivemos.

Sensoriamento Remoto não é uma ciência, mas sim uma tecnologia que depende de várias ciências e tem seus avanços diretamente ligados aos avanços destas (FATORGIS, 2002). O principal objetivo do Sensoriamento Remoto é expandir a percepção sensorial do ser humano, seja através da visão sinóptica (panorâmica) proporcionada pela aquisição aérea ou espacial da informação, seja pela possibilidade de se obter informações em regiões do espectro eletromagnético, inacessíveis à visão humana. De acordo com Fonseca (*op. cit.*), estudar e usar a tecnologia de sensoriamento é uma forma ver a Terra como ela realmente é, além de possibilitar a exploração de conhecimentos que esta tecnologia provê para entender a relação homem-ambiente e usar estes conhecimentos para melhorar esta relação.

## **2.1.2. PRINCÍPIOS E FUNCIONAMENTO**

### **2.1.2.1. Radiação e Espectro Eletromagnético**

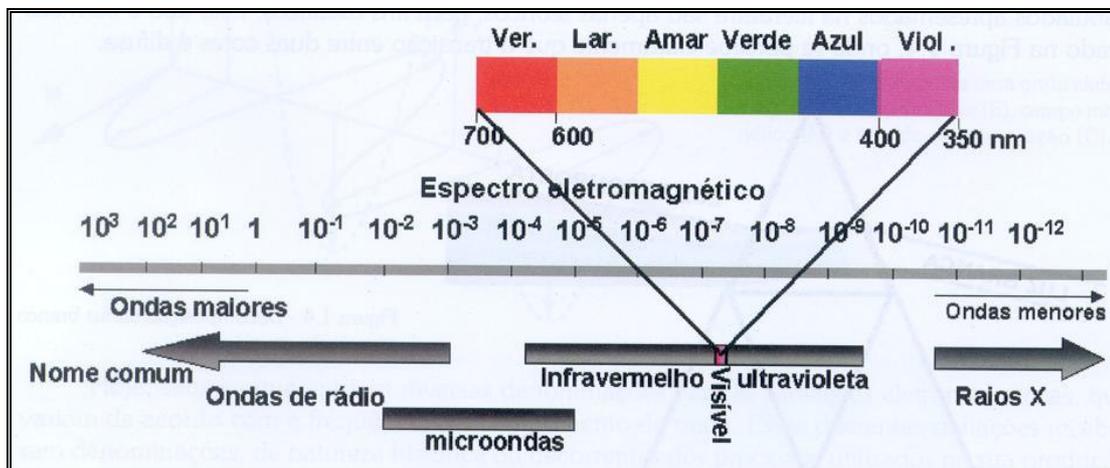
Conforme exposto em MOREIRA (2003), a radiação solar é a fonte de energia para todos os processos físico-químicos e biológicos que ocorrem na superfície terrestre. Segundo o autor, a energia eletromagnética é a base dos princípios em que se fundamenta a tecnologia do sensoriamento remoto e sua compreensão possibilita desencadear uma seqüência de raciocínios sobre esta tecnologia.

A energia eletromagnética é gerada por vários mecanismos, incluindo alterações nos níveis de energia dos elétrons, aceleração de cargas elétricas, decomposição de substâncias radioativas e movimentação termal de átomos e moléculas (CAMPBELL, 1996 *apud* ROSOT, 2001). De acordo com AVERY e BERLIN (1992) *apud* ROSOT (2001), a energia tradicionalmente medida em sensoriamento remoto é a radiação eletromagnética (REM), incluindo a luz visível, que é refletida ou emitida em vários níveis por todos os objetos naturais e sintéticos.

Neste sentido, Moreira (2003) afirma que a radiação eletromagnética ao interagir com os alvos da superfície terrestre pode ser absorvida, refletida, transmitida e emitida por eles seletivamente. Para o autor as proporções de cada uma dessas componentes da interação dependem dos fatores ambientais e os inerentes a cada alvo. Já INPE/DPI (2003a) diz que os processos de absorção, reflexão, transmissão e emissão ocorrem simultaneamente e suas intensidades relativas caracterizam a matéria de investigação. Desta maneira, dependendo das características físicas e químicas da mesma, os quatro processos ocorrem com intensidades diferentes em diferentes regiões do espectro (INPE/DPI, 2003a).

Segundo Moreira (*op. cit.*), conhecendo o comportamento espectral da radiação refletida e/ou emitida de diferentes alvos da superfície terrestre, é possível identificar alvos semelhantes, em diferentes locais, baseado apenas nas semelhanças espectrais. INPE/DPI (*op. cit.*) complementa esta idéia ao afirmar que o comportamento espectral das diversas substâncias é denominado assinatura espectral e é utilizado em sensoriamento remoto para distinguir diversos materiais entre si. Para Moreira (*op. cit.*), é de se pensar que a quantificação e análise da energia refletida e/ou emitida pelos alvos pode ser utilizada como um parâmetro identificador de cada tipo de alvo da superfície terrestre.

A forma como cada alvo reage em diversos intervalos espectrais é fundamental para a extração de forma eficiente de informações dos produtos gerados pelos sensores. Isto implica a necessidade de conhecer tais intervalos espectrais que são construídos com base nos comprimentos de onda (ou frequências) das radiações conhecidas. A organização de todo o conhecimento sobre os diferentes tipos de radiação eletromagnética define o espectro eletromagnético (EEM). Sendo assim, o espectro eletromagnético (Figura 13) está dividido em regiões (bandas ou faixas) cujas denominações estão relacionadas à forma com que as radiações podem ser produzidas ou detectadas.



Fonte: Moreira (2003) p.22.

**Figura 13 – Espectro Eletromagnético.**

O espectro eletromagnético está dividido em regiões ou bandas cujas denominações estão relacionadas com a forma com que as radiações podem ser produzidas ou detectadas (STEFFEN, 2000). Entretanto há certa indefinição em relação aos limites de algumas faixas espectrais, neste sentido foram adotados os limiares definidos e apresentados em Moreira (2003) além das principais características de cada intervalo, conforme INPE/DPI (2003a):

- **Ondas de rádio:** baixas frequências e grandes comprimentos de onda (maior que 1 metro). São utilizadas para comunicação a longa distância (telecomunicações e radiodifusão).

- **Microondas:** faixa de comprimento de onda entre 1 milímetro e 1 metro. Pode-se gerar feixes de radiação eletromagnética altamente concentrados, chamados radares. Por serem pouco atenuados pela atmosfera, ou por nuvens, permitem o uso de sensores de microondas em qualquer condição de tempo.
- **Infravermelho:** grande importância para o sensoriamento remoto. É a região do espectro eletromagnético que estende da região visível à aproximadamente 1 milímetro, incluindo a radiação termal. A radiação infravermelho (IV) é facilmente absorvida pela maioria das substâncias (efeito de aquecimento) e muitas vezes recebe a denominação de radiação térmica. Subdivide-se em:
  - **IV Próximo (NIR – “Near Infrared”):** de 0,7  $\mu\text{m}$  até 1,1  $\mu\text{m}$ .
  - **IV Médio (MIR – “Middle Infrared”):** de 1,1  $\mu\text{m}$  até 3,0  $\mu\text{m}$ .
  - **IV Distante (FIR – “Far Infrared”):** de 3,0  $\mu\text{m}$  até 1000,0  $\mu\text{m}$ .
- **Visível:** radiação capaz de produzir a sensação de visão para o olho humano normal. A pequena banda denominada luz compreende o conjunto de radiações para as quais o sistema visual humano é sensível (comprimentos de onda entre 0,40 e 0,70  $\mu\text{m}$ ). Importante para o sensoriamento remoto, pois imagens obtidas nesta faixa, geralmente, apresentam excelente correlação com a experiência visual do intérprete. Subdivide-se nas seguintes faixas espectrais (observar a estreita faixa do visível, em destaque na Figura 13):
  - **Violeta:** de 0,400  $\mu\text{m}$  até 0,446  $\mu\text{m}$ ;
  - **Azul:** de 0,446  $\mu\text{m}$  até 0,500  $\mu\text{m}$ ;
  - **Verde:** de 0,500  $\mu\text{m}$  até 0,578  $\mu\text{m}$ ;
  - **Amarela:** de 0,578  $\mu\text{m}$  até 0,592  $\mu\text{m}$ ;
  - **Laranja:** de 0,592  $\mu\text{m}$  até 0,620  $\mu\text{m}$ ; e,
  - **Vermelha:** de 0,620  $\mu\text{m}$  até 0,700  $\mu\text{m}$ .
- **Ultravioleta:** extensa faixa do espectro (0,01  $\mu\text{m}$  até 0,40  $\mu\text{m}$ ). Forte atenuação atmosférica nesta faixa, se apresenta como um grande obstáculo na sua utilização. Uso para detecção de minerais por luminescência e poluição marinha.
- **Raios X:** compreende a faixa de 1  $\text{Å}$  à 100  $\text{Å}$ , ou seja, apresenta comprimentos de onda extremamente reduzidos, quase sempre inferiores aos diâmetros atômicos. São gerados, predominantemente, pela parada ou freamento de elétrons de alta energia. Por se constituir de fótons de alta energia, os raios-X são altamente penetrantes, sendo uma poderosa ferramenta em pesquisa sobre a estrutura da matéria além de aplicações na medicina.

O conhecimento do espectro eletromagnético e seus intervalos de comprimento de onda possibilita o desenvolvimento de tecnologias e equipamentos nos mais diversos ramos do conhecimento humano. Especificamente na aplicação em Sensoriamento Remoto, este conhecimento é vital para o estudo e identificação de elementos da superfície da terra.

## **2.1.2.2. Comportamento Espectral dos Alvos**

### **2.1.2.2.1. Resposta Espectral do Solo**

Para Moreira (2003), o solo pode ser definido como um corpo natural da superfície terrestre cujas propriedades são devidas aos efeitos integrados do clima e dos organismos vivos (plantas e animais) sobre o material de origem, condicionado pelo relevo durante um período de tempo. Segundo o autor, a ação combinada dos fatores de formação do solo e dos processos pedogenéticos, resultam em seções verticais (camadas) mais ou menos paralelas à superfície, compondo o perfil do solo. A seção vertical, também denominada de horizonte, é uma informação relevante do ponto de vista pedológico. Entretanto, para o sensoriamento remoto, de acordo com Moreira (*op. cit.*), o horizonte superficial é o mais importante, pois é nele que ocorre a *reflexão da energia*, onde operam a maior parte dos sistemas sensores orbitais. Para o autor, o conhecimento da textura do solo no horizonte superficial é relevante, uma vez que, dependendo da sua granulometria, a radiação eletromagnética pode interagir com os constituintes do solo em maior ou menor intensidade.

Os parâmetros que influenciam a reflectância espectral dos solos são discutidos em Moreira (2003), sendo destacados: os óxidos de ferro, a umidade, a matéria orgânica, a granulometria, a mineralogia da argila e o material de origem. A quantidade de energia refletida por determinado tipo de solo é função de todos esses parâmetros que, conjuntamente, se encontram no solo. O autor acredita que, em determinadas condições, a influência de um parâmetro na energia refletida pelo solo, sobrepuja a dos outros, resultando num espectro característico de tal parâmetro.

As curvas de reflectância espectral dos solos são caracterizadas pelos valores crescentes de reflectância com o aumento do comprimento de onda (ROSOT, 2001). Para o autor, as interações entre a energia e o solo não apresentam grande complexidade quando comparadas com a vegetação, pois a energia para o solo é absorvida ou refletida e, não necessariamente, transmitida para o material, como é o caso da vegetação.

### **2.1.2.2.2. Resposta Espectral da Vegetação**

Para discutir a interação da radiação eletromagnética com a vegetação, seja ela uma floresta, um campo, uma pastagem ou uma cultura agrícola, deve-se inicialmente, segundo Moreira (2003), entender o indivíduo que constitui esta comunidade vegetal, ou seja, a planta, uma vez que é nela que se processam todas as atividades físico-químicas e biológicas, além de ser a menor unidade de vegetação que irá interagir com a radiação. Neste sentido, o autor

descreve a anatomia das plantas classificando-as em dois grandes grupos: órgãos de nutrição e os órgãos de reprodução. Evidencia ainda que, para o sensoriamento remoto, é suficiente entender os órgãos de nutrição e, com mais detalhe, as folhas, porque nelas são realizados todos processos fotossintéticos, ou seja, é basicamente neste órgão que há interação da energia solar com a planta.

Moreira (2003) postula os três componentes resultantes da interação da radiação solar com a planta: *reflectância*, *absortância* e *transmitância*. A parte absorvida (absortância) é a de maior interesse em todas as pesquisas relacionadas à produção vegetal, inclusive no sensoriamento remoto agrícola, porque é por meio da quantificação desta variável, segundo o autor, que podemos tirar conclusões importantes a respeito das condições fitossanitárias de determinada cultura agrícola. A absorção é a componente resultante do fracionamento da radiação solar incidente sobre a vegetação mais importante, pois relaciona-se com a produtividade da planta, sob o ponto de vista fisiológico e bioquímico (Moreira, 2003).

Entretanto, para a grande maioria dos sistemas sensores, principalmente, os orbitais e os suborbitais, medir a radiação absorvida é inviável, a não ser por meio de inferências baseadas no comportamento das quantidades refletidas e/ou emitidas pela vegetação (Moreira, *op. cit.*). Neste aspecto, o autor destaca que a energia refletida pela vegetação tem sido a variável mais utilizada, porque é nesta faixa do espectro eletromagnético que se dispõe da maior quantidade de sensores. Também cita o autor, quando se trata de sensoriamento remoto orbital ou suborbital, a variável absorção é geralmente estimada pela quantificação da parte refletida, por restrições tecnológicas dos equipamentos, que somente registram a radiação refletida ou emitida pelos alvos terrestres e conclui então que, em muitos casos, o analista não chega a estimar a quantidade de radiação absorvida pela planta para inferir sobre o estado da cultura ou vegetação.

COLWELL, 1974 *apud* ROSOT, 2001 afirma que a reflectância da vegetação é influenciada por múltiplos fatores, como: geometria da folha, quantidade e arranjo das folhas, estrutura da planta (galhos e tronco), teor de umidade, condições climáticas e características do solo que isoladamente ou em conjunto provocam modificações no comportamento espectral.

Em geral, as curvas de reflectância espectral da vegetação são bem mais complexas que as dos solos em termos de aparência. Segundo Rosot (2001), a reflectância da cobertura vegetal varia com o comprimento de onda e a análise da curva de reflectância característica da vegetação, pode ser dividida em duas regiões espectrais: região do visível e infravermelho (próximo e médio).

Na **região do visível**, a pigmentação das folhas é o fator dominante onde a maior parte da energia incidente é absorvida e o restante é refletido. Em geral, na região do espectro visível a reflectância é baixa sendo dominadas pelos pigmentos.

No **infravermelho próximo**, os níveis de reflectância são controlados pela estrutura interna das folhas, onde aproximadamente metade da energia incidente é refletida, grande parte do restante é transmitida e pouca energia é absorvida pelas folhas. Em geral, nesta região a reflectância espectral da vegetação é dominada pela complexa estrutura interna da folha, sendo pouco afetada pelos pigmentos e pelo conteúdo de água, observando-se uma alta reflectância pela estrutura interna e baixíssimos níveis de absorção.

No **infravermelho médio**, o teor de umidade da vegetação controla a reflectância, onde grande parte da energia incidente é absorvida pela água presente nas folhas. Nesta região do espectro a reflectância da vegetação caracteriza-se por um decréscimo dos valores da energia refletida, em razão, principalmente, da quantidade de água líquida presente na folha (Moreira, 2003).

### 2.1.2.2.3. Resposta Espectral da Água

Do ponto de vista do sensoriamento remoto, o conhecimento das propriedades físicas da água é essencial para entender sua influência no comportamento espectral dos demais alvos da superfície terrestre (Moreira, 2003).

Na temperatura ambiente, a água é encontrada em três estados físicos (sólido, líquido e gasoso) que influenciam, de modo fundamental, seu comportamento espectral. Em cada um dos estados físicos a absorção da radiação eletromagnética ocorre de maneira diferente. Nos ambientes aquáticos a água caracteriza-se pelo estado líquido, no qual a absorção da luz, segundo NOVO (1989), deve-se a quatro componentes do sistema aquático: substância orgânica dissolvida, biota fotossintetizadora, partículas orgânicas e inorgânicas em suspensão, e a própria água.

Numa análise generalizada da curva de reflectância que relaciona a interação da radiação eletromagnética com a água, Moreira (*op. cit.*) destaca as seguintes conclusões:

- *a água na forma líquida absorve toda a radiação eletromagnética abaixo de 380 nm e acima de 700 nm. Nesta faixa espectral, onde a reflectância é zero, a absorção é total, salienta o autor. Já na faixa entre 380 e 700 nm, a reflectância da água na forma líquida é relativamente pequena, ultrapassando pouco mais de 5%, demonstrando que no estado líquido, a água é um forte absorvedor da radiação em quase todas as faixas do espectro eletromagnético.*
- *a água na forma gasosa apresenta elevada reflectância (em torno de 70%) em todas as radiações eletromagnéticas contidas na região do espectro óptico (400 a*

2.500 nm). O autor observou entretanto, bandas de maior absorção em 1000, 1300 e 2000 nm.

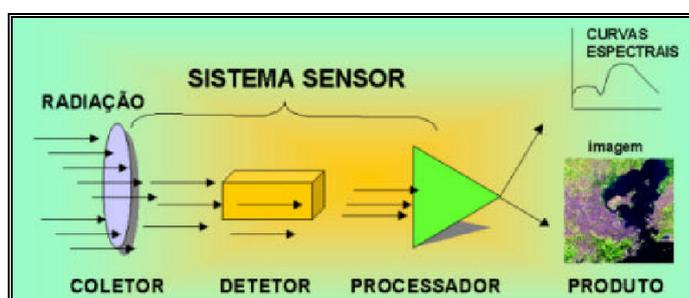
- a água no estado sólido caracteriza-se pela maior reflectância em relação ao estado gasoso até 1200 nm. De 1200 a 2500 nm há um decaimento dos valores de reflectância, indicando uma absorção acentuada da energia nesta região espectral (infravermelho médio). Segundo o autor, nos comprimentos de onda entre 1500 e 2000 nm ocorre a maior absorção da radiação, sendo em 2000 nm a absorção máxima, quando a reflectância chega a um valor aproximado de zero.

Em relação ao estado líquido, Rosot (2001) afirma que os corpos d'água absorvem quase toda energia incidente nos comprimentos de onda do infravermelho, havendo pouca energia para ser refletida. Para o autor, esta característica permite identificar e delimitar mais facilmente os corpos d'água nesta banda (região do infravermelho).

### 2.1.3. SISTEMAS SENSORES<sup>6</sup>

Os equipamentos que medem a radiação eletromagnética são genericamente denominados de radiômetros (*radio*, radiação, e *metro*, medida). De acordo com a plataforma e o sistema de operação, os radiômetros recebem denominações específicas, como os sistemas sensores, espectrofotômetros, radiômetros de banda, entre outros. No campo do sensoriamento remoto orbital, a palavra sensor substitui bem o termo radiômetro. Sensores são dispositivos capazes de detectar e registrar a radiação eletromagnética, em determinada faixa do espectro eletromagnético, e gerar informações que possam ser transformadas num produto passível de interpretação (na forma de imagem, gráfico ou tabelas).

Um **sistema sensor** é constituído basicamente por um **coletor**, que pode ser um conjunto de lente, espelho ou antena; um sistema de registro (**detetor**), que pode ser um filme ou outros dispositivos; e um **processador**, conforme é ilustrado na Figura 14.



Fonte: Moreira (2003) p.118.

**Figura 14 – Partes componentes de um sistema sensor.**

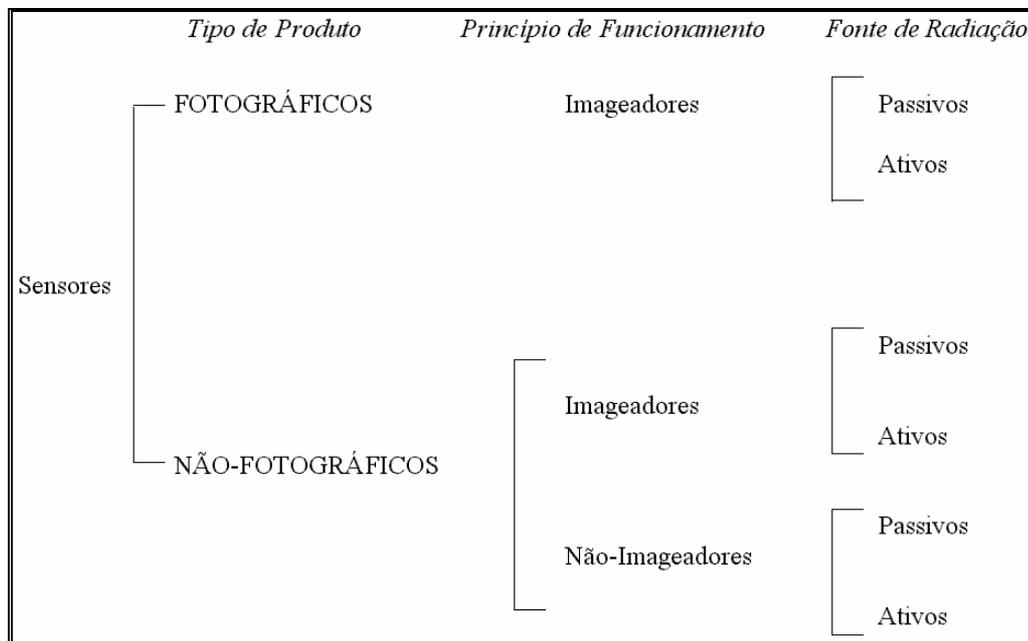
<sup>6</sup> A presente seção (item 2.1.3.) teve como principais referências bibliográficas as obras de Evilyn Novo (1989): “Sensoriamento Remoto – Princípios e Aplicações” e de Maurício Moreira (2003): “Fundamentos do Sensoriamento Remoto e Metodologias de Aplicação”, sendo adotada a segunda bibliografia como fonte para a definição de conceitos e terminologia, adotados no presente trabalho.

Os três principais componentes de um sistema sensor têm as seguintes características:

- **coletor:** é um componente óptico capaz de concentrar o fluxo de energia proveniente da amostra no detetor;
- **detetor:** é um componente de pequenas dimensões feito de um material cujas propriedades elétricas variam ao absorver o fluxo de energia, produzindo um sinal elétrico; e
- **processador:** é um componente responsável pela amplificação do fraco sinal gerado pelo detetor e pela digitalização do sinal elétrico produzido pelo detetor.

### 2.1.3.1. Classificação dos Sistemas Sensores<sup>7</sup>

Os sistemas sensores podem ser classificados quanto: *ao tipo de produto, ao princípio de funcionamento e à fonte de radiação*, conforme é resumido na Figura 15.



Fonte: Moreira (2003) p.121.

**Figura 15 – Classificação dos sistemas.**

Quanto ao tipo de produto os sistemas são classificados em sistemas fotográficos e não-fotográficos. Nesse caso, os sistemas não-fotográficos incluem os não-imageadores e imageadores. A ideia de classificar os sensores nas categorias fotográficos e não-fotográficos é justamente para distinguir o processo de registro da radiação e a forma do produto deles gerados. Por exemplo, enquanto nos produtos fotográficos a energia é representada de maneira contínua (analógica), nos produtos gerados de sensores não-fotográficos imageadores a energia é representada em quantidade discreta.

<sup>7</sup> A presente seção (item 2.1.3.1.) teve como principais referências bibliográficas as obras de Evilyn Novo (1989): “Sensoriamento Remoto – Princípios e Aplicações” e de Maurício Moreira (2003): “Fundamentos do Sensoriamento Remoto e Metodologias de Aplicação”, sendo adotada a segunda bibliografia como fonte para a definição de conceitos e terminologia, adotados no presente trabalho.

*Quanto ao princípio de funcionamento* os sensores (passivos e ativos) são agrupados em duas categorias: de varredura (*scanning*) e de não-varredura (*non scanning*). Os *sensores de não-varredura* registram a radiação refletida de uma área da superfície da Terra em sua totalidade, num mesmo instante, sendo por isso também conhecidos como sensores de quadro (*framing systems*). Os dados de radiação coletados por esses sensores podem ser expressos em duas formas: imagem (por exemplo, sistemas fotográficos) e não-imagem (gráfica ou numérica, por exemplo, radiômetros). Nos *sistemas sensores de varredura*, a imagem da cena é formada pela aquisição seqüencial de imagens elementares do terreno ou elemento de resolução, também chamado de *pixel*. São exemplos de sensores de varredura as câmeras CCD (*Charge Coupled Device*), os radares e os sensores eletroópticomecânicos.

*Quanto à fonte de radiação* os sistemas sensores podem ser classificados como ativos e passivos. Os *sensores passivos* não possuem fonte própria de energia eletromagnética, como por exemplo os sensores do satélite Landsat, os radiômetros e espectrorradiômetros. Os *sensores ativos* possuem uma fonte própria de energia eletromagnética. Eles emitem energia eletromagnética para os objetos terrestres a serem imageados e detectam parte desta energia que é refletida por estes na direção deste sensores. Como exemplo podemos citar o radar e qualquer câmara fotográfica com *flash*.

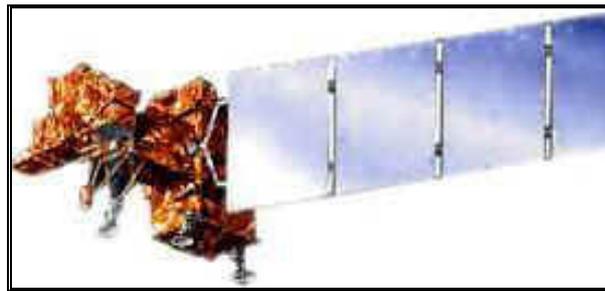
O procedimento de aquisição das medidas das propriedades espectrais dos alvos da superfície terrestre, através dos sistemas sensores, pode ser feito em três níveis: **terrestre, suborbital e orbital**.

No **nível terrestre**, os sistemas sensores podem, ainda, ser instalados em mastros, colocados em barcos, fixados em bóias ou fixados dentro de laboratórios. No **nível suborbital**, geralmente, utiliza-se como plataforma de coleta de dados aeronaves, e para o **nível orbital**, empregam-se os satélites não tripulados e balões. A utilização de um dado sensor ou de outro, num determinado nível de coleta de informações espectrais, depende, sobretudo, de fatores relacionados com: objetivo da pesquisa; tamanho da área imageada; disponibilidade de equipamentos sensores; e, custo e precisão desejada dos resultados obtidos. Entretanto, alguns sistemas sensores são mais exaustivamente utilizados em determinados níveis de coleta de dados do que outros. Por exemplo, os radiômetros portáteis e os espectrorradiômetros são equipamentos muito utilizados para obter informações espectrais em áreas experimentais. Os sensores fotográficos (câmeras fotogramétricas) e, mais recentemente, os radiômetros hiperspectrais são aerotransportados porque são equipamentos com configuração para operar neste tipo de plataforma, ou seja, em nível aéreo. Os “scanners” (imageadores) são muito utilizados em satélites não tripulados como no Landsat, no SPOT, entre outros.

### 2.1.3.2. O Sistema Landsat 7 do sensor ETM<sup>+</sup>

Conforme Rosot (2001), sensores orbitais ópticos (sensores da série Landsat) constituem uma alternativa viável e largamente utilizada no Brasil para o monitoramento de florestas desde a década de 70. O programa Landsat foi o primeiro programa de satélite de sensoriamento remoto destinado a observação dos recursos terrestres, com o objetivo de possibilitar a aquisição de dados espaciais, espectrais e temporais da superfície da Terra de maneira global e repetitiva (RANGEL, 2000).

O Landsat-7 (Figura 16) foi lançado em abril de 1999, na Califórnia, e é o mais recente satélite em operação do programa Landsat, financiado pelo governo norte-americano e operado pela *National Aeronautics and Space Administration* – NASA. O satélite Landsat-7 traz instalado a bordo um sensor (Figura 17) denominado ETM<sup>+</sup> (*Enhanced Thematic Mapper Plus*), o qual não existia nas séries anteriores. O ETM<sup>+</sup> é um sensor de varredura que opera com câmeras CCD (*Charge Coupled Device*), possuindo 8 detetores para a banda 6; 16 detetores para as bandas 1 à 5 e 7; e, 32 detetores para a banda 8 (INPE 2003b).



Fonte: [www.landsat.com.br](http://www.landsat.com.br).

**Figura 16 – Satélite Landsat-7.**



Fonte: [www.landsat.com.br](http://www.landsat.com.br).

**Figura 17 – Sensor ETM<sup>+</sup> do satélite Landsat-7.**

Conforme ENGESAT (2004), alguns aspectos importantes no satélite Landsat-7 são o de possuir mesmo período de revisita (16 dias), resultando na mesma grade de referência de órbita do Landsat-5, além de possuir a mesma área imageada (185 x 185 km por cena). Para ENGESAT (2004) a conservação destes parâmetros técnicos facilita o processo de pesquisa de imagens, que pode ser feito com a mesma grade de referência e a perfeita integração no processamento das imagens do Landsat-7 com dados históricos do Landsat-5 existentes desde 1985, para o caso de utilização dos dois tipos de dados simultaneamente no mesmo projeto para a mesma área em estudos multitemporal.

As imagens do sensor ETM<sup>+</sup> (Figura 17), do satélite Landsat-7, são compostas de oito bandas espectrais (distribuídas conforme a Tabela 4), com destaque para a banda pancromática (PAN), com resolução espacial de 15 metros operando na região do visível ao infra-vermelho próximo e a banda 6 (termal) com resolução espacial de 60 metros<sup>8</sup>. As demais bandas (1 à 5 e 7) operam entre o visível e o infra-vermelho, todas elas com resolução espacial de 30 metros. Para ENGESAT (2004), o avanço tecnológico em relação as resoluções das bandas 6 e 8 permite qualificar o Landsat-7 como sendo um satélite adequado para a geração de imagens de orbitais com aplicações diretas até a escala 1:25.000, em áreas rurais principalmente, mesmo em grandes extensões de território, como acontece freqüentemente no Brasil.

**Tabela 4 – Características espectrais e espaciais do sensor ETM<sup>+</sup> do Landsat-7.**

Banda (canal)	Faixa espectral (µm)	Região do espectro	Resolução espacial (mxm)
1	0,45 - 0,52	Azul	30
2	0,53 - 0,61	Verde	30
3	0,63 - 0,69	Vermelho	30
4	0,78 - 0,90	IV próximo	30
5	1,55 - 1,75	IV médio	30
7	2,09 - 2,35	IV médio	30
6	10,4 - 12,5	IV termal	60
8 (PAN)	0,52 - 0,90	VIS IV próximo	15

Fonte: Moreira (2003) p.174.

Outra diferença notável em relação as séries anteriores do programa Landsat refere-se ao aprimoramento na geometria de imageamento, conforme destacado por ENGESAT (2004), ao afirmar que os produtos orbitais do Landsat-7 resultam numa maior precisão em imagens corrigidas apenas a partir de dados de efemérides de satélite geradas pelo GPS de bordo, muito próxima da precisão obtida com imagens georeferenciadas com pontos de controle cartográficos.

<sup>8</sup> Nas séries anteriores do satélite Landsat, a banda termal (canal 6) apresenta uma resolução bem mais limitada: 120 metros.

Algumas das aplicações do produto orbital do satélite Landsat-7, em função das faixas espectrais (apresentadas na Tabela 4) de operação do sensor ETM<sup>+</sup>, são apresentadas a seguir, conforme descrito em Moreira (2003):

**O canal 1 (azul):** Apresenta grande penetração em corpos d'água, com elevada transparência, permitindo estudos batimétricos. Sofre absorção pela clorofila e outros pigmentos da planta. Apresenta sensibilidade às plumas de fumaça oriundas de queimadas ou outra atividade industrial. Pode apresentar atenuação atmosférica. Aplicação: oceanografia, agricultura etc.

**O canal 2 (verde):** Apresenta grande sensibilidade à presença de sedimentos em suspensão, possibilitando sua análise quanto a quantidade e qualidade de água. Boa penetração em corpos d'água.

**O canal 3 (vermelho):** Região de forte absorção pela vegetação verde. Permite bom contraste entre áreas ocupadas com vegetação e aquelas sem vegetação (solo exposto, estradas e áreas urbanas). Permite análise da variação litológica em locais com pouca vegetação. Apresenta bom contraste entre diferentes tipos de cobertura vegetal (exemplo: campo, cerrado e floresta). Permite o mapeamento da rede de drenagem através da visualização da mata de galeria e entalhamento dos cursos dos rios em regiões com pouca cobertura vegetal. É a banda mais utilizada para delimitar a mancha urbana.

**O canal 4 (infravermelho próximo):** Permite o mapeamento de corpos d'água pela forte absorção de energia nesta região pela água. A vegetação verde, densa e uniforme reflete muito a energia, aparecendo em tom de cinza claro nas imagens. Apresenta sensibilidade à morfologia do terreno, permitindo a obtenção de informações sobre a geomorfologia, solos e geologia. Serve para separar áreas ocupadas com vegetação que foram queimadas.

**O canal 5 (infravermelho médio):** Apresenta sensibilidade ao teor de umidade das plantas, servindo para observar estresse na vegetação, causado por deficiência hídrica. Esta banda sofre perturbações em caso de ocorrência de chuva antes da obtenção da imagem pelo satélite.

**O canal 6 (infravermelho termal):** Apresenta sensibilidade aos fenômenos relativos aos contrastes térmicos, servindo para detectar propriedades termais de rochas, solos, vegetação e água.

**O canal 7 (infravermelho médio):** Apresenta sensibilidade à morfologia do terreno, permitindo obter informações sobre geomorfologia, solos e geologia. Esta banda serve para identificar minerais com íons hidroxilas. É potencialmente favorável à discriminação de produtos de alteração hidrotermal.

Estas aplicações podem ser sintetizadas conforme a Tabela 5, resumidas a partir de INPE/DPI (2003a).

**Tabela 5 – Principais aplicações do sensor EMT<sup>+</sup> em função da faixa espectral.**

Canal	Faixa Espectral ( $\mu\text{m}$ )	Principais aplicações
1	0,45 – 0,52	Mapeamento de águas costeiras Diferenciação entre solo e vegetação Diferenciação entre vegetação coníferas e decídua
2	0,53 – 0,61	Reflectância de vegetação verde sadia
3	0,63 – 0,69	Absorção de clorofila Diferenciação de espécies vegetais
4	0,78 – 0,90	Levantamento de biomassa Delineamento de corpos d'água
5	1,55 – 1,75	Medidas de umidade da vegetação Diferenciação entre nuvens e neve
6	10,4 – 12,5	Mapeamento de estresse térmico em plantas Outros mapeamentos térmicos
7	2,09 – 2,35	Mapeamento hidrotermal

Fonte: Adaptada de INPE (2003a).

#### 2.1.4. RESOLUÇÕES

INPE/SELPER (2002) define resolução como uma medida da habilidade que um sistema sensor possui de **distinguir** entre **respostas que são semelhantes** *espectralmente* ou próximas *espacialmente*. Deste conceito ressalta-se as palavras distinguir (no sentido de discriminar) respostas que são semelhantes, tanto espectrais (variações na energia detectada) quanto espaciais (escala de trabalho), isto em função da complexidade da área de estudo.

FATORGIS (2002) descreve o termo **resolução** em sensoriamento remoto, em relação a qualidade e a natureza da resolução do sistema sensor, podendo se desdobrar em quatro diferentes (e independentes) parâmetros: resolução **espacial**, resolução **espectral**, resolução **radiométrica** e resolução **temporal**.

A **resolução espacial** é definida pela capacidade do sistema sensor em "enxergar" objetos na superfície terrestre; quanto menor o objeto possível de ser visto, maior a resolução espacial. Esta resolução está diretamente relacionada com o tamanho do *pixel*, ou seja, uma determinada quantia em metros quadrados de área no terreno que o sensor é capaz de registrar. A resolução espacial mede a menor separação angular ou linear entre dois objetos.

A **resolução espectral** é um conceito inerente às imagens multiespectrais de Sensoriamento Remoto. É definida pelo número de bandas espectrais de um sistema sensor e pela largura do intervalo de comprimento de onda coberto por cada banda. Quanto maior o número de bandas e menor a largura do intervalo, maior é a resolução espectral de um sensor. O conceito de banda pode ser exemplificado através de fotografias, onde as imagens branco-e-preto tratam-se de apenas uma banda espectral, e as coloridas de três bandas espectrais:

vermelho, azul e verde. Em síntese, a resolução espectral é uma medida da largura das faixas espectrais de um determinado sistema sensor.

A **resolução radiométrica** é dada pelo número de níveis digitais, representando níveis de cinza, usados para expressar os dados coletados pelo sensor. Quanto maior o número de níveis, maior é a resolução radiométrica. Por exemplo, uma resolução de 10 *bits* têm 1024 níveis digitais, 8 *bits* têm 256 níveis digitais, 6 *bits* têm 64 níveis digitais e 1 *bit* têm 2 níveis digitais. O número de níveis de cinza possíveis é dado por:  $2^m$ , sendo “m” o número de *bits*. Cabe salientar que a grande maioria dos aplicativos para tratamento digital de imagens ainda opera com valores de imagens de 8 *bits*, o que implica na necessidade de reamostragem dos níveis de cinza sempre que a resolução radiométrica for superior a 8 *bits*. Em síntese, a resolução radiométrica está associada à sensibilidade do sistema sensor em distinguir alvos que apresentem pequenas diferenças da radiação (refletida e/ou emitida) em certas regiões do espectro eletromagnético.

A **resolução temporal** está relacionada com a repetitividade de observação do sensor numa mesma área da superfície terrestre. No caso de sistemas sensores orbitais, a resolução temporal indica o intervalo de tempo que o satélite leva para voltar a recobrir uma mesma área novamente. A resolução temporal é função das características da plataforma na qual o sensor está colocado. Por exemplo, o satélite Landsat-7 possui uma repetitividade de 16 dias, ou seja, a cada 16 dias o sensor gera uma nova imagem para um mesmo ponto de determinada órbita.

## **2.2. PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGEM**

### **2.2.1. PRÉ-PROCESSAMENTO**

#### **2.2.1.1. Correção Geométrica**

Para Fonseca (2000), a primeira razão para a realização de correção geométrica de imagens é a existência de distorções sistemáticas introduzidas durante a aquisição destas imagens. Segundo CRÓSTA (1992) *apud* LORENA (2001), as imagens geradas por sensores remotos estão sujeitas a uma série de distorções geométricas<sup>9</sup>, não possuindo a *priori* precisão cartográfica quanto ao posicionamento dos objetos, superfície ou fenômeno nelas representados.

---

<sup>9</sup> Para Mather (1987), Crósta (1992), Richards (1995) *apud* Rangel (2000), as distorções geométricas são ocasionadas pela variação na plataforma, rotação e curvatura da Terra, e efeitos panorâmicos relacionados à geometria de aquisição.

Fonseca (2000) afirma que a correção geométrica trata, prioritariamente, da remoção dos erros sistemáticos presentes nas imagens. Para a autora, outros aspectos importantes são os estudos multitemporais tão comuns à área de Sensoriamento Remoto, requerendo que os dados de imagem sejam registrados para possibilitar a interpretação das suas respostas para uma certa posição no espaço. Na verdade, a justificativa mais contemporânea para a correção geométrica de imagens é a integração com mapas e outras informações (Fonseca, *op. cit.*). Neste sentido, ADAMI *et al.* (2002) abordam que em trabalhos com Sistemas de Informações Geográficas (SIG), nos quais as imagens de Sensoriamento Remoto são uma das principais fontes de dados, se torna necessário fazer o registro para a integração dos dados. Ainda em relação à necessidade de correção geométrica e registro, segundo o *Tutorial de Geoprocessamento do Spring 3.5* (INPE/DPI 2003a) é indicada para: *a) integração de imagens obtidas por sensores diferentes (fusão de imagens), b) imagens obtidas em tempos diferentes (análise temporal), c) imagens tomadas em posições diferentes (obtenção de informação tridimensional) e d) mosaico de imagens.*

Na visão de SANTOS (2002), o objetivo da correção geométrica é eliminar os efeitos inseridos nos dados de satélites durante sua aquisição, proporcionando assim, uma imagem digital de sensoriamento remoto com integridade geométrica de um mapa, no qual cada objeto da superfície terrestre representado na imagem possuirá uma associação com um sistema de coordenadas geográficas da superfície terrestre real.

MATHER (1987), CRÓSTA (1992), RICHARDS (1995) *apud* MOURA (2000) afirmam que o procedimento da correção geométrica envolve diretamente três etapas:

**1ª etapa:** *Determinação da relação entre o sistema de coordenadas geográficas de um mapa e a imagem;*

**2ª etapa:** *Estabelecimento de um conjunto de pontos de controle<sup>10</sup>, para definir a posição dos pixels na imagem corrigida, sendo que este conjunto define um “grid” com as propriedades cartográficas do mapa;*

**3ª etapa:** *Cálculo dos valores de intensidade dos pixels na imagem corrigida, por interpolação das intensidades dos pixels da imagem original.*

A primeira e a segunda etapa consistem em definir uma *transformação geométrica*, na qual relaciona-se coordenadas da imagem com as de um mapa de referência, fazendo-se do uso de *pontos de controle* para “amarrar” a imagem no espaço e num sistema de coordenadas idêntico ao da referência (base cartográfica). Estas duas etapas sequenciais definem a operação

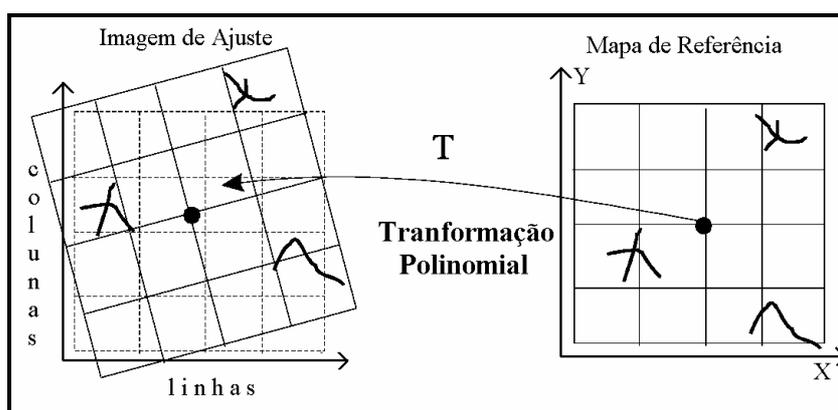
---

<sup>10</sup> Pontos de controle são feições possíveis de serem identificadas de modo preciso, tanto na imagem de ajuste quanto no mapa de referência.

de *registro de imagens*. Na terceira etapa é realizado o cálculo dos valores de intensidade dos *pixels* para a imagem corrigida, ou seja, são definidos os níveis de cinza através de uma *reamostragem por interpolação* sobre os valores da imagem original.

Simplificadamente, a correção geométrica pode ser dividida em duas grandes fases, a saber, a **fase de registro** (definição da transformação geométrica e dos pontos de controle) e a **fase de reamostragem** (interpolação dos níveis de cinza).

### 2.2.1.1.1. Registro de Imagens



Fonte: Adaptado de Fonseca (2000), Adami *et al.* (2002) e INPE/DPI (2003a).

**Figura 18 – Registro da imagem de ajuste ao mapa de referência.**

O registro de imagens requer uma transformação geométrica, onde normalmente utiliza-se um polinômio linear, que pode ser de 1<sup>a</sup>, 2<sup>a</sup> ou 3<sup>a</sup> ordem<sup>11</sup>. Para INPE/DPI (2003a), o registro usa transformações geométricas simples (usualmente transformações polinomiais de 1<sup>o</sup> e 2<sup>o</sup> graus) para estabelecer um mapeamento entre coordenadas de imagem (linhas e colunas) e coordenadas geográficas do sistema de referência (X e Y, longitude e latitude) conforme exemplificado na Figura 18.

LOCH (2000) expõe que um polinômio de 1<sup>o</sup> grau descreve a translação, rotação, escala e obliquidade da imagem. O polinômio de 2<sup>o</sup> grau adiciona parâmetros de torção e convexidade, enquanto os polinômios de 3<sup>o</sup> grau não podem ser explicados por efeitos físicos. Fonseca (2000) afirma que o uso de transformações polinomiais do 1<sup>o</sup> e 2<sup>o</sup> graus é bastante comum no registro de imagens. Para esta autora, as transformações polinomiais fazem o vínculo entre coordenadas de imagem e as coordenadas no sistema de referência através de pontos de controle. Uma vez determinados os *n* pontos de controle e selecionada a transformação polinomial, um sistema de  $2n$  equações é montado para resolver 6 ou 12 parâmetros, dependendo do polinômio ser de 1<sup>o</sup> ou 2<sup>o</sup> grau.

<sup>11</sup> A ordem do polinômio é também denominada de grau da função polinomial.

Richards (1995) *apud* VERONA (2002) diz que o número de pontos de controle depende do grau do polinômio a ser utilizado. Segundo INPE/DPI (2003b), o número mínimo de pontos de controle é de 3 para o polinômio de 1º grau, 6 para o polinômio de 2º grau, e 10 para o polinômio de 3º grau. Entretanto, Fonseca (2000) ressalta que *o número mínimo de pontos de controle representa a situação de um sistema de equações determinado, no qual o número de equações coincide com o número de incógnitas a calcular*, sendo assim, como as coordenadas medidas dos pontos de controle estão sujeitas a erros, convém usar um número de pontos maior que o mínimo, destaca a autora. Sendo assim, a qualidade da correção dependerá da precisão dos pontos de controle e de acordo com LACRUZ (1996) deve-se levar em conta três aspectos importantes: número, localização e distribuição dos pontos. O **número** ideal de pontos de controle depende do tamanho e da complexidade geométrica da imagem. No que se refere à **localização**, é preciso que sejam pontos claramente identificáveis tanto na imagem como na cartografia de referência, e preferencialmente, feições não sujeitas ao dinamismo temporal. Com respeito à **distribuição**, é conveniente que os pontos se situem, uniformemente, sobre toda a imagem.

Determinado o número, localização e distribuição dos pontos de controle claramente discerníveis, obtém-se uma função polinomial, que mapeia as coordenadas do mapa de referência na imagem de ajuste, comparando as posições das coordenadas geográficas correspondentes no terreno. Ao aplicar uma função polinomial para transpor a imagem para um sistema de coordenadas planas e/ou geográficas, erros são gerados e propagados. Tais erros podem ser mensurados através da estimativa do erro médio quadrado, expresso pela seguinte equação, conforme apresentado em Adami *et al.* (2002):

$$EMQ = [ (pt_1^2 + pt_2^2 + pt_3^2 + \dots + pt_n^2) / n ]^{1/2} \quad (\text{Equação 01})$$

Onde: “EMQ” é o erro médio quadrado; “pt” a diferença entre a posição do ponto de controle de referência e o ponto na imagem após a transformação; e “n” o número de pontos de controle.

### 2.2.1.1.2. Reamostragem

Após a seleção de pontos de controle que definem uma função polinomial para a transformação geométrica, resta ainda a definição dos novos valores dos níveis de cinza para a imagem referenciada (corrigida). A definição dos novos níveis de cinza, segundo Fonseca (2000), é chamada de reamostragem e, nada mais é que uma interpolação sobre os níveis de cinza da imagem original. Assim, na etapa de reamostragem ocorre o mapeamento dos valores

de níveis de cinza dos *pixels* da imagem original para o local correto no novo sistema de referência cartográfica.

De acordo com Crósta (1992), Richards (1995), Lacruz (1996), Rangel (2000), MELO (2002) e Verona (2002), os valores dos níveis de cinza são reamostrados através de interpoladores, entre os quais destacam-se os métodos do vizinho mais próximo (*nearest neighbor*), interpolação bilinear (*bilinear interpolation*) e convolução cúbica (*cubic convolution*). Para estes autores, os métodos de interpolação apresentam diferentes precisões em função do modelo de interpolação implementado em cada método.

Rangel (2000) descreve o princípio das técnicas de interpolação:

**Vizinho Mais Próximo:** *Atribui ao valor de nível de cinza do pixel da imagem corrigida, o mesmo valor do nível de cinza do pixel que se encontra mais próximo da posição a ser ocupada. Não há alteração no valor de nível de cinza;*

**Interpolação Bilinear:** *O valor do nível de cinza do pixel é atribuído a partir da média ponderada do valor dos 4 pixels vizinhos. Como resultado, há alteração no nível de cinza, já que é levado em consideração a sua vizinhança;*

**Convolução Cúbica:** *Utiliza-se o valor dos 16 pixels mais próximos. Esta técnica produz imagens com uma aparência mais “natural”, muito embora sejam perdidas feições de alta frequência, já que qualquer tipo de interpolador tem a função de um filtro passa baixa.*

Já STAR & ESTES (1990); MATHER (1999) *apud* VERGARA *et al.* (2001), comentam os resultados destas 3 técnicas de interpolação, indicando as aplicações dos principais interpoladores utilizados para a reamostragem dos níveis de cinza:

**Vizinho mais próximo:** *Este interpolador fornece uma imagem que só tem os valores de cinza originais, com a sua localização adaptada à nova geometria da imagem corrigida; isto pode ser uma vantagem quando vão ser aplicados classificadores. Uma desvantagem é que podem ser eliminadas as transições graduais de tons de cinza na imagem transformada, devido a repetição de alguns desses valores;*

**Interpolador Bilinear:** *Este interpolador exige maior volume de cálculo e produz imagens de aparência mais suave do que as obtidas através do vizinho mais próximo, mas ocasiona uma leve diminuição da resolução da imagem;*

**Convolução Cúbica:** *Esta técnica produz, na imagem resultante, uma aparência mais natural que o vizinho mais próximo e uma degradação espacial menor que o interpolador bilinear, o que a torna apropriada para realizar interpretação visual. Entretanto, pode ocasionar tonalidades de cinza diferentes das originais, não sendo conveniente seu uso quando vão ser aplicados classificadores.*

A escolha do método de interpolação a ser utilizado dependerá do uso que será dado à imagem corrigida e em função das disponibilidades computacionais, visto que este processo é extremamente demorado (Moura, 2000).

### **2.2.1.2. Correção Radiométrica**

Sob a ótica de RICHARDS (1986) *apud* Lacruz (1996), a correção radiométrica tem por objetivo amenizar os efeitos da atmosfera (correção atmosférica) e eliminar os erros produzidos pelos equipamentos. Ao contrário das correções geométricas, nas quais todas as fontes de erro são geralmente retificadas juntas, os processamentos de correção radiométrica são específicos segundo a natureza da distorção.

Na correção radiométrica utilizam-se técnicas capazes de modificar os números digitais originais para torná-los mais próximos dos valores que deveriam estar presentes na imagem (Richards, 1995 *apud* Rangel, 2000).

Segundo Richards (1995) *apud* Verona (2002), as distorções radiométricas que afetam o valor de brilho dos *pixels* de uma imagem podem ser originadas tanto na atmosfera, por efeito do espalhamento da luz em comprimentos de onda específicos (*Espalhamento Rayleigh*<sup>12</sup> e *Espalhamento Mie*<sup>13</sup>), quanto por efeito dos sensores. No caso de distorções originadas pelo espalhamento atmosférico, o efeito será diferente em cada banda, sendo mais presente nas regiões do visível. Nos sensores, o problema está na não-linearidade entre a entrada da radiação captada com o sinal de saída.

Campbell (1996) *apud* Melo (2002) considera a remoção das distorções radiométricas na imagem como uma restauração das condições corretas (hipótese) de campo, pois o valor exato nunca é conhecido. O autor ressalta ainda que, assim sendo, esta correção pode introduzir erros na imagem.

A necessidade de correção destas distorções está relacionada diretamente com a utilização da imagem. Assim, por exemplo, em estudos referentes a mudanças de uso e ocupação do solo durante um determinado período de tempo e usando imagens de um mesmo sensor, ou em estudos sobre a reflectância de campo em períodos e locais diferentes, é necessária a correção de elevação solar e da distância Sol – Terra (LILLESAND E KIEFER,

---

<sup>12</sup> O *espalhamento Rayleigh* é causado predominantemente por moléculas de gás que são muito menor que os comprimentos de onda da luz (Mather, 1999).

<sup>13</sup> O *espalhamento Mie* é causado por partículas que possuem aproximadamente o mesmo tamanho do comprimento de onda, como as partículas de fumaça ou de poeira em suspensão (Mather, 1999).

1994 *apud* Melo, 2002). Já Mather (1999) e Verona (2002) reforçam a necessidade da retificação radiométrica em estudos multitemporais.

Segundo Novo (1989) *apud* LAPOLLI (1994), qualquer que seja a técnica de correção radiométrica, esta sempre acarretará em alteração dos dados originais. Para a autora a aplicação descuidada de técnicas de correção radiométrica pode levar a uma total degradação dos dados originais.

### **2.2.1.2.1. Restauração da Imagem e Eliminação de Ruídos**

Conforme descrito em Fonseca (2000) há várias formas de degradação ou ruídos radiométricos em uma imagem.

A restauração de imagens e eliminação de ruídos visam corrigir os erros dos equipamentos que, segundo Lacruz (1996), geralmente são causados pelo mau funcionamento dos sensores, traduzindo-se em linhas ou *pixels* perdidos. A falha de um detetor é visualizada na imagem como uma série de linhas anômalas, pretas e brancas ou *pixels* isolados com características similares que representam uma informação perdida. Assim, os níveis de cinza correspondentes a estas linhas ou *pixels* perdidos podem ser estimados a partir dos níveis de cinza dos *pixels* vizinhos.

De acordo com o INPE/DPI (2003b), a restauração é uma técnica de correção radiométrica cujo objetivo é corrigir as distorções introduzidas pelo sensor óptico no processo de geração das imagens digitais. Conforme apresenta Fonseca (2000), através de técnicas de restauração é possível melhorar a resolução efetiva do sensor até um certo nível, uma vez que, segundo INPE/DPI (2003b), uma imagem digital é uma cópia borrada da cena, dado que os detalhes vistos na cena são suavizados devido as limitações do sensor. A idéia de restaurar a imagem é reduzir este efeito de borramento. A restauração de imagens e eliminação de ruídos são recomendados (INPE/DPI, *op. cit.*) para serem realizados sobre a imagem original sem qualquer tipo de processamento, tal como o realce, que altera as características radiométricas da imagem.

Já a eliminação de ruídos (INPE/DPI, 2003b) tem como objetivo eliminar ou reduzir os pontos de ruído na imagem, minimizando as diferenças entre os níveis de cinza registrados no processo de geração de imagens devido as falhas de detetores, limitações do sistema eletrônico do sensor, entre outras causas.

Geralmente os *pixels* com ruído aparecem como pontos com níveis de cinza bem diferentes da sua vizinhança, apresentando-se escuros (pretos) ou saturados (brancos). Estes

pontos ruidosos podem aparecer distribuídos aleatoriamente (*pixels* isolados) ou de forma sistemática<sup>14</sup> (listras verticais e horizontais).

*Pixels* isolados, deteriorados por ruído e distribuídos aleatoriamente na imagem, são bastante comuns (Fonseca *op. cit.*). Os *pixels* ruidosos podem ser substituídos pelas *médias dos vizinhos mais próximos*, desde que haja segurança de que estes não estejam deteriorados pelo ruído. Conforme a autora, filtros não lineares como o filtro da mediana e filtros morfológicos podem ser usados nestes casos.

Ainda de acordo com Fonseca *op. cit.*, a presença de linhas "ruins" é devido à má qualidade dos valores de níveis de cinza dos *pixels* ou mesmo da perda total de informação ao longo de uma linha (ou coluna) de determinada banda. Para a autora, uma forma simples de solucionar este problema é estimar os valores dos *pixels* da linha com defeito usando os valores dos *pixels* da linhas anterior e posterior (acima e abaixo).

Segundo NISHIDA (1998), algumas das técnicas para eliminação de ruídos são: os filtros verticais, os filtros passa-baixa e o ajuste do histograma.

#### **2.2.1.2.2. Correção Atmosférica**

Santos (2002) afirma que os componentes da atmosfera interferem diretamente na quantidade de energia que chega até a superfície terrestre e na quantidade de energia que chega até o sensor. Segundo esta autora, dependendo dos componentes da atmosfera, a influência na detecção da energia eletromagnética pelo sensor será maior ou menor. Este efeito é denominado espalhamento atmosférico, que é o resultado da interação entre a radiação eletromagnética e as partículas e/ou moléculas de gases presentes na atmosfera (SLATER, 1980; Mather, 1999 *apud* Santos 2002). De acordo com Lapolli (1994), o espalhamento atmosférico causa um aumento no valor do brilho e afeta principalmente a região do visível (entre 0,4 e 0,7  $\mu\text{m}$ ). E ainda, Lacruz (1996) diz que o efeito do espalhamento atmosférico diminui a medida que aumenta o comprimento de onda.

Assim, conforme Rangel (2000), as reflectâncias dos alvos da superfície terrestre, registradas pelos sensores a bordo de satélites são influenciadas pelas interferências atmosféricas produzidas pelo espalhamento de moléculas e partículas, pela absorção de gases, entre outras. Em função destas interferências é desejável que os dados originais sejam

---

<sup>14</sup> Segundo Lacruz (1996) ruídos lineares, também chamados de *striping*, são perceptíveis na imagem como linhas ou grupos periódicos de linhas, mais escuras ou mais claras em relação às linhas adjacentes. Moreira (2003), define o *striping* como sendo um lapso de reação de resposta dos detectores quando recobrem áreas de baixa radiância após terem passado por áreas de alta radiância.

submetidos à correção atmosférica antes de serem analisados. Para CHEN *et al.* (1995) *apud* Rangel (2000), a correção atmosférica se faz necessária na quantificação de dados de sensoriamento remoto, uma vez que as interferências atmosféricas modificam tanto a magnitude da resposta quanto as características espectrais dos alvos.

A atenuação dos efeitos atmosféricos de uma imagem pode ser efetuada através de vários métodos que diferem tanto na simplicidade, como na sua precisão (Lacruz, 1996). Já Chen (1996) *apud* Rangel (2000) afirma que as distorções radiométricas presentes em imagens de sensoriamento remoto podem ser retificadas da seguinte maneira: através da conversão de radiância para reflectância, normalização de histogramas de imagens e pelo método de subtração dos *pixels* escuros.

Conforme Lacruz (1996), um dos métodos mais simples para amenizar os efeitos atmosféricos é o método de subtração do *pixel* escuro, também denominado correção do histograma pelos seus valores mínimos (*Histogram Minimum Method - HMM*). Este método considera que as áreas cobertas com materiais de forte absorvância, como água e zonas de sombra, deveriam apresentar uma radiância nula, e portanto, o que estas áreas estão registrando é atribuído à atmosfera. Assim, basta subtrair o valor registrado em cada banda, de cada um dos *pixels* dessa banda (CHUVIECO, 1990). Segundo Crósta (1992), o método de subtração dos *pixels* escuros é capaz de minimizar os efeitos da atmosfera de maneira simples, já que utiliza apenas informações presentes nos dados de sensoriamento remoto digital.

### **2.2.2. REALCE**

A interpretação de imagens é muitas vezes dificultada pelas degradações inseridas nos processos de geração e visualização da imagem (Fonseca, 2000). Para a autora, as técnicas de realce visam melhorar a qualidade visual destas imagens e enfatizar alguma característica de interesse para uma aplicação específica. O INPE/DPI (2003b), por sua vez, conceitua o realce como a técnica que visa melhorar a qualidade da imagem, permitindo uma melhor discriminação dos objetos presentes na imagem. Segundo Melo (2002) o realce é utilizado somente para distinguir características ou contornos de interesse na imagem, adaptando-as ao nosso sistema visual humano.

Os dados de satélites, uma vez processados, podem conter um contraste espectral de baixa qualidade visual (Moreira, 2003). Daí resulta a necessidade de realçar as similaridades ou as diferenças entre os objetos em função do objetivo de aplicação dos dados, possibilitando uma melhor extração dos alvos de interesse, seja para classificação digital, seja para análise visual.

De acordo com Lapolli (1994) em função dos tipos de transformações, as técnicas de realce podem ser divididas em *radiométricas*, *espaciais* e *espectrais*. A autora define estas três diferentes técnicas conceituando:

- ***realce radiométrico ou de contraste*** é aquele onde se muda apenas o valor do nível de cinza do pixel, como resultado da aplicação de um tipo de transformação.
- ***realce espacial*** é quando se muda o valor do nível de cinza do pixel em função da sua relação com seus vizinhos.
- ***realce é espectral*** quando o valor do nível de cinza do pixel é comparado entre os diferentes canais dos sistemas sensores dos satélites.

Pode-se distinguir ainda em dois tipos as técnicas de realce, considerando as transformações de nível de cinza, conforme Fonseca (2000):

- ***operações pontuais***: modificação da escala de cinza, onde o novo valor do ponto depende só do valor antigo deste ponto; e
- ***operações locais***: filtragem, onde o novo valor do ponto depende também dos valores da vizinhança.

São consideradas técnicas de realce as seguintes operações:

- ***realce de contraste***: ajuste de contraste, transformações lineares ou realce linear;
- ***transformações multiespectrais***: transformação por componentes principais (TCP), transformação IHS (Intensidade, Matiz e Saturação, do inglês: Intensity, Hue, Saturation), modelo de mistura espectral e as operações aritméticas entre bandas.

### 2.2.2.1. Realce de Contraste

O aumento de contraste pode ser aplicado através de vários procedimentos, dentre os quais destacam-se: o aumento linear de contraste e o aumento bilinear ou multilinear de contraste (Lacruz, 1996).

De acordo com INPE/DPI (2003b), a técnica de realce de contraste tem por objetivo melhorar a qualidade das imagens sob os critérios subjetivos do olho humano e é normalmente utilizada como uma etapa de pré-processamento para sistemas de reconhecimento de padrões. Neste sentido, o contraste entre dois objetos pode ser definido como a razão entre os seus níveis de cinza médios. Para INPE/DPI op. cit. a manipulação do contraste consiste numa transferência radiométrica em cada “pixel” e realiza-se a operação ponto a ponto, independentemente da vizinhança.

Fonseca (2000), em relação ao realce de contraste, diz que, tipicamente, os sensores são capazes de discretizar os valores recebidos da cena em um intervalo máximo que vai de 0 até 255 (para uma resolução radiométrica de 8 bits, ou seja, 256 possibilidades de valores).

Segundo esta autora, devido à má iluminação, defeitos do sensor ou mesmo às características da cena, o intervalo de valores de intensidade ocupados pelos *pixels*, pode ser muito menor que esse intervalo máximo. Diz-se então que a imagem possui baixo contraste, o que torna difícil a sua visualização ou interpretação.

Em síntese, pode-se aplicar o realce de contraste utilizando-se uma função matemática denominada transformação radiométrica. Esta função consiste em mapear as variações dentro do intervalo original de tons de cinza, para um outro intervalo desejado e é utilizado para aumentar o contraste de uma imagem, expandindo o intervalo original de níveis de cinza da imagem original.

Lacruz (1996) aborda que no aumento linear de contraste, são designados os valores de 0 e 255, respectivamente ao menor e ao maior valor de nível de cinza da imagem, e os valores intermediários são distribuídos linearmente entre esses extremos. No entanto, no aumento bilinear ou multilinear de contraste, são realçadas somente determinadas regiões do histograma através de um aumento linear, enquanto as regiões restantes não são modificadas.

O INPE/DPI (2003b) afirma que o aumento de contraste por uma transformação linear é a forma mais simples para se executar o realce. Para INPE/DPI *op. cit.* a função de transferência é uma reta e apenas dois parâmetros são controlados: a inclinação da reta e o ponto de interseção com o eixo X. A inclinação controla a quantidade de aumento de contraste e o ponto de interseção com o eixo X controla a intensidade média da imagem final. Como resultado do aumento linear de contraste, as barras que formam o histograma da imagem de saída são espaçadas igualmente, uma vez que a função de transferência é uma reta. O histograma de saída é idêntico em formato ao histograma de entrada, exceto que ele possui um valor médio e um espalhamento diferentes.

#### **2.2.2.2. Transformações Multiespectrais**

De acordo com CARVALHO (2003), dentre as técnicas de transformações multiespectrais pode-se citar: transformação por componentes principais (TCP), transformação IHS, modelo de mistura espectral e operações aritméticas entre bandas.

A **transformação por componentes principais** (TCP) é uma técnica frequentemente utilizada para a remoção da correlação e redução da dimensionalidade (SHIMABUKURO *et al.* 2000). Na TCP há uma transformação no espaço de atributos para que haja a remoção de redundâncias espectrais.

A **transformação IHS** é uma das técnicas mais utilizadas para fusão de imagens de diferentes resoluções (SCHOWENGERDT, 1997 *apud* Carvalho 2003). A transformação IHS

permite a separação da informação espacial, através do componente intensidade, da informação espectral, através dos componentes matiz e saturação de uma composição colorida de três imagens, sendo assim possível manipular independentemente a informação espacial, mantendo o balanço de cores da cena original (CARPER *et al.* 1990 *apud* Carvalho 2003).

O **modelo de mistura espectral** parte da premissa de que a radiância observada em cada *pixel* de uma imagem é a integração de todos os materiais no campo de visão do sensor, ou seja, é o resultado da combinação linear das respostas de diferentes componentes da superfície mais a contribuição da atmosfera (SHIMABUKURO & SMITH, 1991). A proporção de cada componente em um *pixel* pode ser estimada através da aplicação de um modelo de mistura linear, utilizando estimadores de proporção baseados no critério dos mínimos quadrados (Shimabukuro & Smith, 1991). Neste sentido, INPE/DPI (2003b) conceitua um modelo linear de mistura espectral como sendo um modelo no qual o valor do *pixel* em qualquer banda espectral é considerado como a combinação linear da resposta de cada componente dentro do *pixel*.

As **operações aritméticas** são transformações pontuais (*pixel a pixel*) entre imagens de bandas diferentes (INPE/DPI, 2003a), através de uma regra matemática definida, tendo como resultado uma banda representando a combinação das bandas originais. De acordo com INPE/DPI (2003a) as operações mais comuns são a soma, subtração, divisão (ou razão entre bandas) e a multiplicação de uma banda por uma constante (realce linear). Em geral, a operação de adição é utilizada para realçar similaridade entre bandas e a subtração, a multiplicação e a divisão, para realçar as diferenças espectrais. Ainda segundo INPE/DPI *op. cit.* as operações aritméticas são transformações aplicadas para:

- *Remover efeitos de ganho provenientes de variações espaciais ou temporais, quando ocorrem em bandas de uma mesma imagem;*
- *Diminuir variações de radiância da imagem, provenientes de efeito de topografia, declividade e aspecto; e*
- *Aumentar o contraste entre solo e vegetação, utilizando a razão entre as bandas referentes ao vermelho e infravermelho próximo, gerando os chamados índices de vegetação.*

Para Lapolli (1994), a princípio não se pode afirmar qual a melhor técnica a ser utilizada, haja visto que os resultados obtidos do realçamento são avaliados pelo analista, tornando esse julgamento muito subjetivo.

### 2.2.3. CLASSIFICAÇÃO

Nas duas seções anteriores<sup>15</sup> procurou-se descrever procedimentos que visavam corrigir distorções e realçar informações de interesse através de técnicas específicas de processamento digital de imagens, ou seja, foram abordadas técnicas e operações com a finalidade de preparar o produto orbital (imagem) para posterior classificação. Neste sentido, o presente item busca detalhar o contexto da classificação de imagens na qual identificam-se grupos homogêneos de *pixels*, representando características ou padrões, relacionados com classes de uso e cobertura do solo.

O termo *classificação* é compreendido nesta pesquisa, conforme definição do INPE/DPI (2003b), como sendo o processo de extração de informação em imagens para reconhecer padrões e objetos homogêneos, utilizado em sensoriamento remoto para mapear áreas da superfície terrestre.

A categorização de objetos homogêneos deriva do reconhecimento de padrões que, segundo SOUZA (1999), é uma ciência abrangente, estudada em diversos campos de pesquisa como biologia, psicologia, medicina, marketing, finanças, meteorologia, sensoriamento remoto, processamento de imagens, entre outros. Para o mesmo autor, reconhecimento de padrões é, por natureza, uma ciência inexata, admitindo assim muitas abordagens, algumas vezes complementares, outras competitivas, para aproximar, indicar ou encontrar soluções a um dado problema. E complementa que o processamento de imagens é um problema genérico de reconhecimento de padrões<sup>16</sup>, usado com dois objetivos distintos: melhorar a aparência visual das imagens e prepará-las para avaliar suas características e estruturas presentes.

De acordo com GIANNOTTI (2001), existe uma variedade de algoritmos disponíveis para as operações de classificação, dentre os quais há aqueles que se baseiam em modelos de distribuição de probabilidade estatística para as classes de interesse e outros em que o espaço multiespectral é simplesmente particionado em regiões de classes específicas. Assim, RICHARDS (1995) *apud* Giannotti (2001) afirma que estudos comparativos entre diferentes técnicas de classificação são necessários para a busca da técnica mais apropriada diante da cena a ser estudada. Já Lapolli (1994) complementa esta idéia ao afirmar que a escolha de qual classificador utilizar, depende de uma análise da natureza do dado de entrada e a saída desejada.

---

<sup>15</sup> Item 2.2.1. e item 2.2.2.

<sup>16</sup> SOUZA (1999) divide em quatro grandes grupos os métodos de classificação, segundo as abordagens de reconhecimento de padrões: estatística, sintática, neural e difusa. O autor apresenta e discute as características de cada abordagem destacando as principais modelagens promissoras.

Uma característica importante na classificação de imagens é que nenhuma abordagem individual é ótima, de modo que métodos e abordagens múltiplas devem ser utilizados combinando-se várias modalidades de sensores, pré-processamentos e métodos de classificação (JOHNSON & WICHERN, 1998; *apud* SANTOS *et al.*, 2003).

Segundo Moura (2000), entende-se por técnicas de classificação digital de imagens os procedimentos utilizados para separar e identificar alvos na superfície terrestre utilizando sistemas eletrônicos, auxiliando o elemento humano na interpretação das informações contidas na cena. Conforme Lorena (2001), geralmente os algoritmos de classificação multiespectral automática dividem-se em função da presença ou não de uma fase de treinamento, pela qual o analista fornece amostras que orientam a classificação digital. Neste contexto, Fonseca (2000) afirma que em relação ao tipo de treinamento, a classificação digital de imagens pode ser dividida em dois grupos: **supervisionada** e **não supervisionada**, descritas a seguir:

*Na abordagem supervisionada, o treinamento consiste no reconhecimento da assinatura espectral de cada uma das classes de uso do solo da área imageada. Para alguns classificadores (algoritmos), esse reconhecimento envolve a obtenção de parâmetros estatísticos (média, matriz de covariância, etc.) de cada classe contida na área. Para outros, o reconhecimento baseia-se apenas no nível mínimo e máximo de cinza na área fornecida para o treinamento.*

*Na abordagem não supervisionada, o treinamento difere uma vez que utiliza algoritmos cujo reconhecimento de padrões espectrais se faz sem o treinamento tradicional, ou seja, sem fornecer parâmetros espectrais de cada uma das classes contidas na cena. Entretanto, isso não quer dizer que não haja participação do analista. Geralmente, esses algoritmos necessitam de alguns tipos de informações de entrada (input) para que o sistema realize a classificação não supervisionada. (MOREIRA, 2003)*

Giannotti (2001) descreve que na **classificação supervisionada**, o classificador deve ser treinado para reconhecer os padrões espectrais dos alvos, usando áreas de treinamento representativas das classes de interesse, onde as informações de campo são disponíveis. Para MASCARO & FERREIRA (2003), a classificação digital supervisionada de imagens adota como pressuposto a necessidade de conhecimento prévio da área de estudo a partir de trabalhos de campo, de tal forma a permitir ao intérprete delimitar sobre a imagem áreas representativas de cada categoria definida na legenda, chamadas de amostras de treinamento (*training sites*). Segundo CHUVIECO (2000), a partir destas amostras, o algoritmo do classificador estima parâmetros estatísticos aos níveis de cinza que definem cada uma das categorias, e designa o restante dos *pixels* da imagem a uma destas categorias. Por apresentar estas características os

algoritmos de classificação supervisionada são recomendados para regiões onde o analista tem um conhecimento prévio da área de estudo e das classes temáticas. Os métodos de classificação supervisionada implementados no Spring 3.5. (INPE/DPI, 2003a) são: *distância mínima*, *paralelepípedo*, e o da *máxima verossimilhança*<sup>17</sup>.

Já na **classificação não supervisionada**, também denominada de agrupamento (*clustering*), as classes são agrupadas por similaridade sem, no entanto, haver determinação prévia da relação entre essas e as categorias de uso/coertura do solo a serem discriminadas (Mather, 1999 *apud* Giannotti, 2001). Segundo VIEIRA (2004) na classificação não supervisionada os dados são examinados e divididos nos agrupamentos espectrais naturais predominantes presentes na imagem. Daí então, segundo a autora, o analista identifica esses agrupamentos como classes de cobertura do solo, por meio de uma combinação de sua familiaridade com a região estudada e visitas para levantamento de verdade de campo. Os métodos de classificação não supervisionada são indicados quando não se tem um conhecimento prévio da área (Crósta, 1992). Dentre os métodos de classificação não supervisionada implementados no Spring 3.5. (INPE/DPI, 2003a) cita-se: *K-médias (pixel a pixel)* e *IsoSeg*<sup>18</sup> (por regiões).

Moreira (2003) ressalta que tanto a classificação supervisionada quanto a não supervisionada possuem regras de decisão para que o classificador associe determinado *pixel* a determinada classe ou regiões de similaridade de níveis de cinza. Tais regiões são baseadas nas características espectrais do *pixel*, ou do *pixel* e seus vizinhos. Sendo assim, conforme MOREIRA & SOUZA (2001), a análise dos atributos dos “*pixels*” contidos na imagem pode ser feita com base no “*pixel*” ou no “*pixel*” e seus vizinhos, denominadas respectivamente de classificação “*pixel a pixel*” e classificação “por regiões”. Neste sentido, INPE/DPI (2003b) descreve em função do processo de classificação empregado, os classificadores em dois tipos:

- **Classificadores “*pixel a pixel*”:** usam apenas a informação espectral isoladamente de cada *pixel* para achar regiões homogêneas. Estes classificadores podem ainda ser discriminados daqueles que usam métodos estatísticos (ou seja, que utilizam regras da teoria de probabilidade) e determinísticos (que não utilizam estas regras); e
- **Classificadores por regiões:** utilizam, além de informação espectral de cada “*pixel*”, a informação espacial que envolve a relação entre os “*pixels*” e seus vizinhos. Estes classificadores procuram simular o comportamento de um fotointérprete, ao reconhecer áreas homogêneas de imagens. A informação de borda é utilizada, inicialmente, para a separação de regiões e as propriedades espaciais e espectrais unem áreas com a mesma textura.

---

<sup>17</sup> O método de classificação pelo algoritmo da máxima verossimilhança, objeto de análise desta pesquisa, é abordado mais adiante no item 2.2.3.1.

<sup>18</sup> O método de classificação IsoSeg, objeto de análise desta pesquisa, é abordado mais adiante no item 2.2.3.2.

A seguir detalha-se os métodos de classificação empregados no presente trabalho para o mapeamento temático do uso e cobertura do solo, contemplando: a) classificador supervisionado (algoritmo MaxVer) que opera *pixel a pixel*; b) classificador não supervisionado (algoritmo IsoSeg) que considera a relação entre os *pixels* e seus vizinhos (por região); e, c) classificação visual (interpretação em tela).

### **2.2.3.1. Classificador MaxVer**

Para Lapolli (1994), a classificação usando o algoritmo de máxima verossimilhança (MaxVer) é o método de classificação supervisionado mais comumente usado com dados de sensoriamento remoto. De acordo com AIT BELAID *et al.* (1992) *apud* Giannotti (2001), a avaliação e identificação de culturas agrícolas através de imagens de sensoriamento remoto é usualmente feita utilizando o classificador supervisionado por máxima verossimilhança, baseado na informação *pixel a pixel*.

O classificador MaxVer, segundo INPE/DPI (2003b), é um método de classificação que considera a ponderação das distâncias entre médias dos níveis digitais das classes, utilizando parâmetros estatísticos. Esse algoritmo parte do pressuposto que os níveis de cinza de cada classe seguem uma distribuição normal multivariada. Em outras palavras, Moreira (2003) descreve que no MaxVer, a distribuição espectral das classes de uso do solo, por exemplo de milho, a variação na resposta espectral tem um comportamento multivariado (gaussiano), isto é, muitas plantas de milho apresentarão uma resposta espectral média; outras, resposta espectral abaixo da média; e, outras, ainda, resposta espectral acima da média. Segundo o autor a densidade de probabilidade da distribuição normal multivariável estará completamente especificada se forem determinados o vetor média e a matriz de covariância das amostras de treinamento.

Os conjuntos de treinamento definem o diagrama de dispersão das classes e suas distribuições de probabilidade, considerando a distribuição de probabilidade normal para cada classe de treinamento (INPE/DPI, 2003b). Assim, considerando duas classes com distribuição de probabilidade distintas, as distribuições representam a probabilidade de um “*pixel*” pertencer a uma ou outra classe, dependendo da posição do “*pixel*” em relação a esta distribuição. Ocorre ainda, uma região onde as respostas espectrais das duas classes sobrepõem-se, indicando que um determinado “*pixel*” tem igual probabilidade de pertencer às duas classes. Nesta situação, segundo INPE/DPI (2003b), estabelece-se um critério de decisão a partir da definição de limiares de aceitação.

O limiar de aceitação corresponde a uma restrição imposta pelo analista ao sistema de classificação, ou seja, indica a porcentagem de *pixels* de uma classe que será classificada como pertencente a esta classe (Moreira, 2003). Por exemplo, um limiar de 95% indica que, de todos os *pixels* da classe, 5% será ignorado (os de menor probabilidade), sendo todos aqueles cuja resposta espectral dos alvos for comum a duas classes ao mesmo tempo.

Em resumo, a classificação pelo algoritmo MaxVer supõe uma função de densidade de probabilidade associada à assinatura espectral de uma área de treinamento conhecida e representativa (homogênea e distribuída), além da escolha de um limiar de aceitação para definir um limite que distinga a qual classe temática irá pertencer determinado *pixel* quando houver sobreposição das classes.

### 2.2.3.1.1. Áreas de Treinamento

Cabe ainda ressaltar a questão da distribuição das áreas de treinamento. Conforme Lapolli (1994), quando se aplicam técnicas estatísticas de classificação (como é o caso do classificador pela máxima verossimilhança) deve-se ter o número de *pixels* das áreas de treinamento grande o bastante, para permitir a estimativa das características espectrais da classe de interesse. Entretanto, Moreira (2003) enfatiza ainda que é fundamental que as amostras de treinamento contenham amostras de *pixels* puros, representativos de cada classe espectral. O conjunto destas amostras define um pacote de treinamento, com o qual o classificador mensura o diagrama de dispersão das classes em torno de uma média e suas distribuições de probabilidades (considerada normal, como já discutido) para então avaliar e atribuir cada *pixel* à classe cuja probabilidade dele pertencer seja a maior. Neste aspecto, Lapolli (1994) destaca que esse método é subjetivo<sup>19</sup>, dado que o analista tenta classificar categorias de informação que são muitas vezes compostas de classes espectrais diferentes.

Disto resulta o maior problema da fase de classificação pelo algoritmo MaxVer, que remete a obtenção de amostras de *pixels* puros, representativos de cada classe espectral. Sendo a resposta espectral de um alvo terrestre uma combinação mascarada pela resposta espectral proveniente da superfície de fundo ou de outros alvos dentro da área; um mesmo tipo de alvo, por exemplo uma área de cultivo, pode apresentar mais de um comportamento espectral em função do ataque de pragas e doenças, épocas de plantio, condições edafoclimatológicas etc., dificultando a identificação de um padrão característico para a resposta espectral da classe e, conseqüentemente, a obtenção de amostras de *pixels* puros para o treinamento.

---

<sup>19</sup> Moreira & Souza (2001) destacam que o treinamento é muito subjetivo, pois é feito segundo um critério estabelecido pelo analista, o que pode gerar um pacote de treinamento que não contém todas as variações possíveis dos atributos espectrais de uma determinada classe de ocupação do solo.

### 2.2.3.2. Classificador IsoSeg

A classificação pelo algoritmo IsoSeg busca contornar a dificuldade de obtenção de *pixels* puros nas amostras de treinamentos, conforme enfatizado no item anterior. Por ser um **classificador por regiões**, a classificação pelo IsoSeg considera além da informação espectral de cada *pixel*, a informação espacial que envolve a relação entre os *pixels* e seus vizinhos (região) (INPE/DPI, 2003b). Por ser uma **técnica de classificação não supervisionada**, o usuário não informa *a priori* o número nem quais são as classes que devem ser encontradas durante a classificação (Fonseca, 2000).

De acordo com Moreira (2003) este classificador procura simular o comportamento de um fotointérprete ao reconhecer áreas homogêneas nos dados orbitais, baseados nas propriedades espectrais e espaciais dessas áreas na imagem. A idéia principal deste algoritmo, segundo Moreira (*op. cit.*) é de que a informação de borda seja utilizada inicialmente para separar regiões; e as propriedades espaciais e espectrais sejam empregadas para agrupar áreas com mesma textura.

Como alternativa à abordagem de classificação baseada no *pixel* (pontual), a classificação por regiões tem como etapa fundamental a segmentação da imagem (segmentação do espaço de atributos). Segundo SCHOWENGERDT (1997), BARROS *et al.* (2001), *apud* Giannotti, (2001) a segmentação espacial-espectral pode ser definida como uma forma de incorporar informações espaciais e espectrais em um processo não supervisionado de agrupamento. As regiões definidas pelo processo de segmentação têm sido definidas como um conjunto de *pixels* conectados, conforme sua vizinhança, que apresentam uniformidade interna para um conjunto, e difere de regiões vizinhas para esses mesmos atributos (Lorena, 2001).

Além da consideração da vizinhança e da eliminação da subjetividade na escolha das amostras de treinamento, a classificação pelo algoritmo IsoSeg mostra-se promissora ao observar a tendência de decréscimo da exatidão de mapeamento obtida por classificadores *pixel a pixel* quando há um aprimoramento da resolução espacial de imagens. Este fato é observado por Barros *et al.* (2001) e Giannotti (2001) que ressaltam a tendência de melhoria das resoluções espaciais vigentes (imagens multiespectrais com resolução espacial de aproximadamente 4 metros) sendo disponibilizadas com o lançamento de satélites como QuickBird (*Earth Watch*), Ikonos (*Space Imaging*), e OrbView (*Orbimage*), passa a ser inevitável a busca e exploração de técnicas que considerem regiões como elemento de análise (APLIN *et al.*, 1999 *apud* Giannotti, *op. cit.*).

INPE/DPI (2003a) define o classificador IsoSeg como um algoritmo de agrupamento de dados não supervisionado, disponível no Spring, para classificar regiões (caracterizadas por

seus atributos estatísticos de média e matriz de covariância, e pela área) de uma imagem segmentada. O classificador IsoSeg, utilizando **crescimento por regiões**<sup>20</sup> para segmentação, tem sido a técnica mais empregada e indicada para o mapeamento de áreas agrícolas e florestadas conforme BINS *et al.* (1996), SHIMABUKURO *et al.* (1997), Moreira & Souza (2001), Moreira (2003) e INPE/DPI (2003a). Conforme apresentado e discutido por Moura (2000) a **segmentação por crescimento de regiões**<sup>21</sup> é realizada em função: dos níveis de cinza da imagem (**limiar de similaridade**) e da área mínima (**limiar de área**). De acordo com o autor a definição destes limiares é uma etapa crítica do processo e que determina a precisão da segmentação. Bins *et al.* (1996) afirmam que a escolha dos limiares é dependente das características da cena e dos resultados pretendidos pelo usuário. Segundo INPE/DPI (2003b):

*A similaridade define a diferença mínima entre o valor de um pixel e o valor médio da região contígua a ele, para que este pixel possa ser agrupado a esta região. Se a diferença entre o valor do pixel e a média da região vizinha for maior que o valor de similaridade definida pelo usuário, o pixel não será agrupado naquela região.*

*A área mínima define o tamanho da região definida pelo usuário, ou seja, não haverá regiões com área em pixel menor do que o valor pré estabelecido.*

De acordo com Moreira (2003), o algoritmo IsoSeg não assume nenhum conhecimento prévio da distribuição de densidade de probabilidade das classes temáticas, fato que ocorre no algoritmo MaxVer. Para o autor, a aplicação do algoritmo IsoSeg resume-se em três etapas seqüências: 1<sup>a</sup>) definição do limiar; 2<sup>a</sup>) detecção das classes e 3<sup>a</sup>) competição entre classes, conforme descrição a seguir sintetizada com base em Fonseca (2000), Moreira (2003), INPE/DPI (2003b).

**1. Definição do limiar:** *o usuário define um limiar de aceitação, dado em porcentagem, com o qual calcula-se uma distância mínima entre as regiões pertencentes a mesma classe. Quanto maior o limiar, maior a distância entre as regiões (mais rigorosa a classificação) e portanto maior será o número de classes diferentes detectadas pelo algoritmo.*

**2. Detecção das classes:** *as regiões são ordenadas em ordem decrescente de área e inicia-se o procedimento para*

---

<sup>20</sup> INPE/DPI (2003a) define crescimento de região como uma técnica de agrupamento de dados, na qual somente as regiões adjacentes, espacialmente, podem ser agrupadas. Inicialmente, o processo de segmentação rotula cada "pixel" como uma região distinta. Então, calcula-se um critério de similaridade para cada par de região adjacente espacialmente. Este critério de similaridade baseia-se em um teste de hipótese estatístico que testa a média entre as regiões. A seguir, divide-se a imagem em um conjunto de sub-imagens e então realiza-se a união entre elas, segundo um limiar de agregação previamente definido.

<sup>21</sup> A segmentação por crescimento de regiões é utilizada na classificação pelo algoritmo IsoSeg, implementado no Spring.

*agrupá-las em classes. Atribui-se um novo rótulo a região de maior área que ainda não tenha sido classificada. Agrupa-se a ela todas as regiões cuja distância seja inferior ao valor mínimo definido pelo limiar de aceitação. Esta fase se repete até que todas regiões tenham recebido algum rótulo.*

**3. Competição entre classes:** *uma vez que a etapa 2 é um processo seqüencial que pode favorecer as classes que são detectadas em primeiro lugar, a etapa 3 visa eliminar este "favorecimento", procedendo uma "competição" entre classes. Esta competição consiste em reclassificar todas as regiões, usando no cálculo da distância as médias e matrizes de covariância dos agrupamentos obtidos na etapa anterior. O processo repete-se até que a média das classes não se altere (convergência). Ao término do processo, todas regiões estarão associadas a uma classe.*

Conforme descrito em Fonseca (2000), Moreira (2003), INPE/DPI (2003b) ao término, todas as regiões estarão associadas a uma classe definida pelo algoritmo. O usuário deverá então associar estas classes (denominadas temas, no SPRING) àquelas por ele definidas segundo o esquema conceitual do *Modelo de Dados*.

Em síntese, a classificação não supervisionada pelo algoritmo IsoSeg é aplicada sobre um conjunto de regiões que resultam do processo de segmentação, denominado crescimento de regiões (no caso do Spring), caracterizadas por sua média, matriz de covariância e pela área. Da imagem segmentada são extraídas as regiões em função dos limiares (similaridade e área) testados e definidos de acordo com o tipo de dado e objetivo da aplicação. A seguir, o sistema de aplicativo fornece a delimitação das classes de acordo com a proporção de área ocupada na imagem, restando ao usuário/analista associar tais classes de acordo com os temas de interesse.

### **2.2.3.3. Classificação Visual**

Em relação ao tratamento de imagens digitais, especificamente a *classificação*, é interessante esclarecer que, por falta de uma terminologia apropriada na literatura, são encontradas várias expressões sobre esse procedimento, como classificação automática, classificação digital, análise digital, interpretação digital, tratamento digital, entre outras (Moreira, 2003).

Neste trabalho, adotou-se que a interpretação de imagens pode ser realizada através da análise visual e/ou análise digital; tendo como consideração, ainda, que classificação é sinônimo de análise, não automático é sinônimo de visual (fotointerpretação) e, automático é sinônimo de digital. Desta maneira, a análise digital ou classificação automática (feita por computador) envolve a análise dos atributos numéricos de cada *pixel* na imagem, por isso é

considerada uma análise quantitativa (Fonseca, 2000). Já a análise visual ou classificação não automática é conhecida como fotointerpretação onde, o especialista humano extrai as informações baseando-se na inspeção visual da imagem (Fonseca, 2000). Para esta autora essas duas abordagens são importantes e muitas vezes complementares. Lacruz (1996) acrescenta que cada uma destas análises apresenta suas vantagens quanto ao custo, à rapidez, ao sucesso, à experiência prévia, ao treinamento, entre outros fatores, o que não torna ambas as técnicas excludentes entre si.

Como síntese, pode-se dizer que, enquanto a *classificação automática* utiliza técnicas computacionais para tentar simular a capacidade do sistema visual humano no reconhecimento de padrões espectrais, a *classificação não automática* utiliza técnicas de fotointerpretação requerendo intensamente a intervenção do usuário para a delimitação e classificação dos dados remotamente sensoriados. Neste sentido, Moreira (*op. cit.*) afirma que a principal vantagem do uso do computador no reconhecimento de padrões, em relação à interpretação visual, é que eles são capazes de processar um grande volume de informações de imagem, tarefa esta limitada ao ser humano.

Retomando ao tema classificação visual, cita-se DAINELLI (1990) *apud* Moreira (2003) ao dizer que fotografias aéreas e imagens obtidas por satélites são produtos do sensoriamento remoto que podem ser fotointerpretados por intermédio de um conjunto de processos, envolvendo a análise visual de imagens, denominado fotointerpretação. Segundo Moreira (*op. cit.*), a interpretação visual de imagens orbitais é muito semelhante à interpretação de fotografias aéreas, uma vez que na interpretação visual são utilizados elementos fotointerpretativos (características) empregados na técnica de fotografias aéreas, como: textura, forma, tamanho, tonalidade e cor, entre outros, discutidos a seguir.

A **textura** refere-se à combinação da magnitude e frequência da variação tonal numa imagem, sendo produzida pelo efeito conjunto de todas as pequenas feições que compõem uma área em particular na imagem, definindo a aparência rugosa ou lisa da imagem (Melo, 2002). Para Lacruz (1996), a textura fornece a impressão visual de rugosidade ou de suavidade criada por alguns objetos permitindo discriminar áreas com comportamento espectral similar. Segundo Moreira (*op. cit.*), a textura depende das características dos alvos, da resolução espacial e da escala.

O **tamanho** e a **forma** dos objetos da superfície terrestre são muito importantes na interpretação de imagens, principalmente quando associado a outras características dos alvos (Moreira, 2003). Segundo Lacruz (1996), a **forma** baseia-se nos aspectos geométricos das feições, sendo que em muitos casos permite a distinção entre feições naturais e aquelas feitas

pelo homem, como por exemplo entre floresta natural e áreas de reflorestamento. Já o **tamanho** revela a dimensão dos objetos e varia com a escala da imagem. De acordo com este autor, objetos com formas iguais podem ser diferenciados pelo seu tamanho relativo.

A **tonalidade** denota a cor e/ou o brilho dos objetos que compõem a cena, auxiliando na sua identificação e diferenciação com os demais objetos (Melo, 2002). A tonalidade é um parâmetro qualitativo que indica a presença de alvos com reflectâncias diferentes (Moreira, 2003). Conforme o autor, às vezes, dois alvos distintos apresentam tonalidades (tons de cinza) semelhantes e por esta razão, não se deve utilizar apenas a tonalidade como critério de separação de dois temas observados numa imagem.

Neste sentido observa-se que a **cor** é muito empregada no lugar da tonalidade. Conforme Lacruz (1996), nas imagens coloridas, as gradações de tonalidades (tons de cinza) são substituídas por variações de cores, possibilitando uma maior extração de informações, já que o olho humano é mais sensível às mudanças de cores do que a intensidade luminosa de cinza. Para Moreira (2003), na fotointerpretação a cor pode ser usada como parâmetro para discernir tipos diferentes de vegetação ou estágio de desenvolvimento de determinada espécie, principalmente quando se trata de áreas agrícolas.

A **sombra** é outra característica fundamental na fotointerpretação, principalmente para o sucesso na interpretação de imagens de satélite, observa Moreira (2003). Segundo o autor, na maioria das vezes, a sombra dificulta a distinção dos alvos porque omite o tipo de ocupação do solo; entretanto, às vezes, a sombra deixa de ser um fator negativo e passa a contribuir no auxílio à visão de diferentes tipos de vegetação. Neste sentido, Melo (2002) expõe que a sombra pode revelar as características de área dos objetos. Já Lacruz (1996) afirma que as sombras permitem definir as formas de relevo e o reconhecimento de alguns objetos presentes na imagem.

Lacruz (*op. cit.*) acrescenta ainda outros elementos de menor importância (localização e associação) mas que devem ser considerados na análise visual de imagens. De acordo com o autor:

- **Localização:** *refere-se ao contexto espacial da imagem a ser interpretada. É dada pelas relações dos objetos e feições vizinhas e pela familiarização do intérprete com a área de trabalho.*
- **Associação:** *refere-se ao fato de que muitos objetos se apresentam comumente associados com outros, assim, a presença de um destes objetos indica ou confirma o outro.*

Textura, tamanho, forma, sombra, tonalidade e cor dos objetos da superfície terrestre são características essencialmente importantes na interpretação dos alvos e ganham relevância

quando analisadas de maneira conjunta e integradamente, possibilitando uma melhor compreensão da física do imageamento (respostas dos alvos, comportamento da radiação e do espectro eletromagnético). Essas características, por sua vez, estão diretamente relacionadas com a associação dos objetos e com a localização da área imageada fornecendo a chave para a extração de informações das imagens.

#### 2.2.4. AVALIAÇÃO DA CLASSIFICAÇÃO<sup>22</sup>

Independentemente dos dados e métodos que a originaram, uma classificação só pode ser considerada confiável após a análise da exatidão (acurácia) dos resultados gerados.

Uma das formas mais eficientes de representar a exatidão de uma classificação de imagens digitais é através da matriz de erro ou matriz de confusão, pois esta descreve tanto os **erros de inclusão ou concessão** quanto os **erros de exclusão ou omissão** (CONGALTON & GREEN, 1999). Além disso, a matriz de erros permite também calcular outras medidas de exatidão, como a exatidão total, a exatidão do ponto de vista do produtor e a exatidão do ponto de vista do consumidor ou usuário (STORY & CONGALTON, 1986). Por **erro de inclusão** (erro do consumidor ou usuário) entende-se a probabilidade de ser aceito como bom um mapa ruim e por **erro de omissão** (erro do produtor) a probabilidade de ser rejeitado um mapa bom. A Tabela 6 mostra uma matriz de erro genérica, onde  $n_{ij}$  é o número de *pixels* da classe  $\omega_j$  classificados como da classe  $\omega_i$ . A Tabela 7 mostra um exemplo numérico da matriz de erro e cálculo da exatidão.

**Tabela 6 – Matriz de erro ou matriz de confusão.**

		Verdade				
		$\omega_1$	$\omega_2$	...	$\omega_M$	
Classe	$\omega_1$	$n_{11}$	$n_{12}$	...	$n_{1M}$	$n_{1+}$
	$\omega_2$	$n_{21}$	$n_{22}$	...	$n_{2M}$	$n_{2+}$
	....	....	....	....	....	....
	$\omega_M$	$n_{M1}$	$n_{M2}$	...	$n_{MM}$	$n_{M+}$
		$n_{+1}$	$n_{+2}$	...	$n_{+M}$	<b>N</b>

Fonte: Gaboardi (2002) adaptada de SMITS *et al.* (1999).

<sup>22</sup> Extraído integralmente do item 2.5. “Análise da Exatidão”, da dissertação de mestrado de GABOARDI (2002).

**Tabela 7 – Exemplo numérico da exatidão do produtor e do usuário.**

		Referência			Total linha
		$\omega_1$	$\omega_2$	$\omega_3$	
Classe	$\omega_1$	28	14	15	57
	$\omega_2$	1	15	5	21
	$\omega_3$	1	1	20	22
Total	coluna	30	30	40	100

<b>Exatidão do Produtor</b>	<b>Exatidão do Usuário</b>
classe $\omega_1$ : 28/30=93%	classe $\omega_1$ : 28/57=49%
classe $\omega_2$ : 15/30=50%	classe $\omega_2$ : 15/21=71%
classe $\omega_3$ : 20/40=50%	classe $\omega_3$ : 20/22=91%

Fonte: Gaboardi (2002) adaptada de Story e Congalton (1986).

Da matriz de erro obtém-se a exatidão global ( $P_o$ ), que corresponde ao número de unidades amostrais classificadas corretamente, dividido pelo número total de unidades amostrais. Na matriz de erro,  $P_o$  corresponde à soma dos elementos da diagonal principal, dividida pela soma de todos os elementos da matriz, conforme Equação 02:

$$P_o = \sum_{i=1}^M P_{ii} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^M n_{ii} \quad (\text{Equação 02})$$

onde:

$n_{ii}$ : número de unidades amostrais classificadas corretamente, ou seja, o número de unidades amostrais que pertencem à classe “i” e que foram classificadas nesta mesma classe. Correspondem aos valores da diagonal principal da matriz de erro;

N: número total de unidades amostrais;

$P_{ii}$ : proporção de unidades amostrais classificadas corretamente por classe ( $P_{ii} = n_{ii}/N$ );

M: número de classes.

Ao realizar classificações de uma mesma cena, através de diferentes métodos, são encontradas diferentes matrizes de erro, decorrendo daí a necessidade de se verificar se essas matrizes diferem significativamente. Para isso, torna-se necessária a utilização de métodos mais complexos de medida de exatidão. Entre os métodos mais utilizados para a medida da exatidão está o coeficiente de concordância Kappa, por retirar do cálculo do índice da classificação correta a parte referente à alocação puramente aleatória das classes.

### 2.2.4.1 Coeficiente de Concordância Kappa<sup>23</sup>

O coeficiente de concordância Kappa é uma técnica de medida de exatidão que pode ser utilizada para determinar se uma matriz de erro é significativamente diferente de outra (Congalton & Green, 1999). O coeficiente Kappa é dado por:

$$K = \frac{P_o - P_c}{1 - P_c} \quad (\text{Equação 03})$$

Onde  $P_o$  representa a exatidão global dada pela Equação 02 e  $P_c$ , representa a proporção de unidades que concordam por pura casualidade. Na matriz de erros (representada na Tabela 6),  $P_o$  representa “o somatório dos elementos da diagonal principal da matriz, dividido pelo total dos elementos”, e  $P_c$ , a somatória dos produtos das proporções marginais das linhas e colunas da matriz (BRITES *et al.*, 1996).

$P_c$  é dado por:

$$P_c = \sum_{i=1}^M P_{i+} P_{+j} = \frac{1}{N^2} \sum_{i=1}^M n_{i+} n_{+j} \quad (\text{Equação 04})$$

onde:

$n_{i+}$  é a soma dos valores da linha i (valor marginal da linha i);

$n_{+j}$  é a soma dos valores da coluna j (valor marginal da coluna j);

$P_{i+}$  é a soma proporcional da linha i ( proporção marginal da linha i) e

$P_{+j}$  é a soma proporcional da coluna j (proporção marginal da coluna j).

Das Equações 02, 03 e 04, obtém-se a equação geral para o cálculo do estimador do coeficiente de concordância Kappa em função dos elementos da matriz de confusão (Congalton & Green, 1999):

$$\hat{K} = \frac{N \sum_{i=1}^M n_{ii} - \sum_{i=1}^M n_{i+} n_{+i}}{N^2 - \sum_{i=1}^M n_{i+} n_{+i}} \quad (\text{Equação 05})$$

A variância do estimador do coeficiente de concordância Kappa é dada por (BISHOP *et al.*, 1975; Congalton & Green, 1999):

---

<sup>23</sup> Extraído integralmente do item 2.5.1. “Coeficiente de Concordância Kappa”, da dissertação de mestrado de GABOARDI (2002).

$$\hat{\sigma}_k^2 = \frac{1}{N} \left( \frac{\phi_1(1-\phi_1)}{(1-\phi_1)^2} + \frac{2(1-\phi_1)(2\phi_1\phi_2 - \phi_3)}{(1-\phi_2)^3} + \frac{(1-\phi_1)^2(\phi_4 - 4\phi_2)^2}{(1-\phi_2)^4} \right) \quad (\text{Equação 06})$$

onde:

$$\phi_1 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^M n_{ii}$$

$$\phi_3 = \frac{1}{N^2} \sum_{i=1}^M n_{ii}(n_{+i} + n_{+i})$$

$$\phi_2 = \frac{1}{N^2} \sum_{i=1}^M n_{i+}n_{+i}$$

$$\phi_4 = \frac{1}{N^3} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M n_{ij}(n_{j+} + n_{+i})^2$$

Uma aproximação do estimador da variância de Kappa é dada por (MA & REDMOND, 1995; Brites *et al.*, 1996):

$$\hat{\sigma}_k^2 \cong \frac{P_o(1-P_o)}{N(1-P_c)^2} \quad (\text{Equação 07})$$

Embora o coeficiente de concordância Kappa tenha sido amplamente utilizado em análises de exatidão de mapeamento, não há uma fundamentação teórica para indicar quais os níveis mínimos aceitáveis deste coeficiente numa classificação. Diversos autores (CALDEIRA, 1994; VIEIRA, 1996; CORREIA, 1999) usaram uma tabela proposta por LANDIS & KOCH (1977) com esta finalidade. Esta tabela, obtida empiricamente, associa critérios qualitativos de aceitação com intervalos de valores de  $\hat{K}$ . Outra tabela, proposta por FLEISS (1981) também associa a qualidade da classificação aos valores de  $\hat{K}$ . Estes conceitos de  $\hat{K}$  e seus respectivos valores são apresentados na Tabela 8.

**Tabela 8 – Conceitos do Coeficiente Kappa.**

Kappa:	<0	0.00	0.20	0.40	0.60	0.75	0.80	1.00
L&K		Péssimo	Ruim	Razoável	Bom	Muito Bom		Excelente
Fleiss		Ruim			Bom		Excelente	

Fonte: Gaboardi (2002) adaptada de Landis & Koch (1977) e Fleiss (1981).

## 2.3. MAPEAMENTO TEMÁTICO DO “USO E COBERTURA DO SOLO” E SISTEMAS DE CLASSIFICAÇÃO

Tendo em vista o objetivo e a finalidade desta pesquisa, torna-se necessário e imprescindível uma revisão e conceituação de alguns termos inerentes ao mapeamento proposto, bem como do aplicativo utilizado para classificação temática. Neste sentido, a seguir são apresentados e discutidos a nomenclatura utilizada, o sistema de classificação convencionalmente adotado e o *software* SPRING.

### 2.3.1. NOMENCLATURA UTILIZADA

Os trabalhos que tratam do termo **uso, cobertura e ocupação do solo** são aplicados por diferentes ciências, com distintas finalidades. Os termos **uso e/ou ocupação do solo** são empregados muitas vezes como sinônimos, não existindo uma definição unívoca no meio científico. Desde a década de 70 este tema já causava polêmica e contradições, conforme ANDERSON *et al.* (1979) *apud* Melo (2002), que informam sobre a diversidade de opiniões quanto à compreensão do termo “**uso e ocupação do solo**”. KUERTEN (1998) salienta que a considerável diversidade de opiniões é percebida também quanto ao que vem a ser o “**uso da terra**” e “**cobertura da terra**”. Neste sentido, Kuerten (*op. cit.*), discorre que muitos trabalhos utilizam o termo “**uso do solo e/ou cobertura do solo**” ou outros termos semelhantes como: *ocupação do solo, uso e cobertura vegetal, ocupação das terras, revestimento do solo*, entre outros. Algumas destas definições são apresentadas a seguir de acordo com as bibliografias pesquisadas.

De acordo com CLAWSON & STEWART (1965), Anderson *et al.* (1979) *apud* Kuerten (1998), o termo **uso da terra** (*land use*) refere-se a atividade do homem na terra, que se acha diretamente relacionada com a terra. Semelhante a esta definição, CAMPBELL (1997) conceitua o termo **uso da terra** como as atividades humanas na terra realizadas de acordo com as suas necessidades, acrescentando que o resultado destas atividades são mudanças físicas, transformando o meio ambiente. Para ORELLANA (1985) *apud* Kuerten (1998) e SALGADO (2002), o **uso da terra** é o reflexo da relação homem-ambiente, de como ele percebe este ambiente e como ele se comporta neste, expressando a utilização de recursos naturais renováveis e não renováveis num determinado espaço. Para Kuerten (1998), *o relacionamento de uma comunidade com o meio é função da cultura do povo, seu modo de vida, seus desejos, suas aspirações, o conhecimento que foi adquirido através das gerações – e essa concepção*

*conduz à noção de espaço e ambiente.* Deste modo, Salgado (2002) diz que o **uso da terra** torna-se o ponto de ligação decisivo entre os processos sociais e naturais. Segundo esta autora, são exemplos de **uso da terra**: as áreas urbanas, a agricultura e áreas de pastagem. Já o termo **revestimento** ou **cobertura da terra** (*land cover*), por outro lado, refere-se aos elementos, naturais ou não, que recobrem a superfície da terra (Anderson *et al.* 1979 *apud* Kuerten, 1998). Para Salgado (*op. cit.*) são exemplos de **cobertura ou revestimento**: as coberturas vegetais, os corpos d'água, as áreas consideradas inacessíveis devido à localização, e situações de ausência parcial do homem.

AGUIAR (2003) *in* CÂMARA & MONTEIRO (2003) expõe que os conceitos de **uso** do solo e **cobertura** do solo são similares, podendo se confundir em alguns casos, mas não equivalentes. Para Kuerten (*op. cit.*) os conceitos de **uso** e **cobertura**, entretanto, estão intimamente relacionados pois as finalidades para as quais as terras estão sendo usadas relacionam-se diretamente com os tipos de revestimento da superfície. Na ótica de AGUIAR (2002) enquanto **cobertura** revela o estado físico, químico e biológico da superfície da terra (floresta, gramíneas, áreas construídas), tendo interesse nas *ciências naturais*; o **uso** caracteriza o emprego da terra pelo homem (reserva indígena, pecuária, área residencial) e tem interesse nas *ciências sociais*.

Na abordagem de Aguiar (2002), uma mesma **cobertura** pode corresponder a diferentes usos (floresta usada para extração de madeira e recreação). No geral, segundo a autora, um sistema de **uso** corresponde à uma **cobertura**, mas pode combinar a manutenção de mais do que um, como por exemplo, um sistema agrícola combinando culturas e pastagens melhoradas.

Em síntese, adotou-se neste trabalho as concepções de JENSEN e COWEN (1999) *apud* Melo (2002), conferindo a seguinte nomenclatura: o **uso do solo** significa “*como o solo está sendo utilizado*”, ou seja, a atividade do homem sobre o solo; e a **cobertura do solo** refere-se à “*cobertura natural e artificial encontrada na superfície*”.

Desta maneira, o mapeamento do **uso e cobertura do solo** proposto neste trabalho, remete a busca da delimitação temática em classes: de uso (agricultura, pastagem) e de cobertura (cobertura vegetal, silvicultura); visando à produção de informações cartográficas destinadas à aplicação em modelos de erosão hídrica, com a finalidade de subsidiar uma proposta de zoneamento adequado do solo por meio de simulações e modelagens da perda do solo<sup>24</sup>.

---

<sup>24</sup> Recomenda-se CHECCHIA (2005) no prelo.

### 2.3.2. SISTEMAS DE CLASSIFICAÇÃO

Inicialmente cabe dizer que não se pode padronizar um sistema único de classificação, pois este varia devido a realidade de cada região geográfica, além do objetivo e finalidade de aplicação que será dado para o mapa temático resultante. No entanto, existem idéias básicas que servem como referência para a classificação temática.

A elaboração de mapas de uso e cobertura do solo com vistas ao levantamento dos recursos naturais apresenta uma série de dificuldades, pois não existe uma metodologia para a classificação do “Uso e Cobertura” que seja ideal para todas as regiões, necessidades e escalas de trabalho (Kuerten, 1998). Segundo este autor, além das peculiaridades locais, existem diferentes perspectivas no processo de classificação e o processo em si tende a ser subjetivo. Entretanto, o autor complementa esta idéia ao afirmar que existem alguns parâmetros básicos que podem servir de ponto de partida na elaboração do roteiro metodológico a ser utilizado nos trabalhos de mapeamento. Os parâmetros listados foram sintetizados por Kuerten (*op. cit.*) com base em Anderson *et al.* (1979), AGRA FILHO & VIEGAS (1995):

*1. As variáveis escolhidas devem ser representativas e relevantes, de modo a refletir com clareza e objetividade a área de estudos.*

*2. A escala de trabalho deve ser compatível com o nível de detalhamento que se deseja.*

*3. A teoria dos geossistemas tem apresentado bons resultados na definição das classes de uso e ocupação. Parte-se do princípio de que a paisagem (o todo) deve ser parcelada para ser estudada. No entanto, esse todo não se reconstitui a partir do somatório das partes e sim, através das funções que essas partes representam.*

*4. Nos mapeamentos deve-se levar em conta que, ao se dividir a área de estudo em unidades, parcelas ou qualquer outro nome que se venha a dar, são indissociáveis as noções de homogeneidade e heterogeneidade interna das parcelas territoriais. Sempre haverá trechos de diferenciações paisagísticas no interior de uma unidade, apesar de ser ela considerada como “homogênea”.*

*5. Sistema de classificação, além de satisfazer e de responder adequadamente a todas as situações possíveis de serem encontradas, deverá também se ajustar à quantidade e qualidade de dados disponíveis, de forma a fazer pleno uso deles.*

*6. O sistema de classificação deverá ser aplicável à interpretação de imagens de sensores remotos disponíveis e deverá permitir identificar áreas com características suficientemente homogêneas, de modo que seja possível se fazer afirmações específicas a respeito de seu uso ou tipo de cobertura.*

7. *Níveis hierárquicos são os diversos graus de abstração adotados para classificar os elementos. Um sistema de classificação pode definir diversos níveis hierárquicos com classes, subclasses e assim por diante. O que se procura é a formação de classes com o máximo de significado e o mínimo de níveis.*

Segundo JOLY (1990) *apud* Melo (2002), um sistema de classificação é uma forma de generalizar informações, apagando ou atenuando as características desprezíveis e realçando as mais importantes. Para Melo (*op. cit.*) um sistema de classificação é também uma forma de ordenar e organizar as informações de uso e cobertura do solo. Para a classificação de imagens, a FIBGE (1997) *apud* Melo (2002) destaca quatro parâmetros importantes:

- ✓ O **embasamento teórico** empregado na rotulação: refere-se à metodologia utilizada para a classificação;
- ✓ A **estrutura de dados** cartográficos: compreende as relações de disponibilidade dos dados e a forma de como serão utilizados;
- ✓ A **data de aquisição dos dados** utilizados para a sua confecção: referente a viabilidade do mapa para um determinado estudo e possibilidade de monitoramento da informação;
- ✓ A **escala de mapeamento**: corresponde à relação entre dimensões utilizadas na representação gráfica, definindo o limite para a observação do espaço geográfico, estabelecendo uma pequena dimensão linear (referente à menor área observada), e uma larga dimensão linear, correspondente à extensão geográfica da área de estudo.

### 2.3.3. SOFTWARE SPRING

Todo o trabalho de processamento digital de imagens foi realizado com auxílio do programa *Sistema de Processamento de Informações Georreferenciadas – SPRING*, nas versões 3.4 e 3.5, elaborado e disponibilizado pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais/Divisão de Processamento de Imagem (INPE/DPI). Este aplicativo, além de permitir a representação dos dados espacializados e informações geradas em formatos convencionalmente utilizados pela comunidade de geotecnologias, possui como característica intrínseca as potencialidades e limitações de um SIG de 2ª geração<sup>25</sup>.

---

<sup>25</sup> CÂMARA & MEDEIROS (1996) é uma das referências que aborda e discute o estado atual e a evolução dos SIGs, subdividindo em três gerações em função do nível de tecnologia, do uso principal, do ambiente de trabalho e da forma como os sistemas são disponibilizados. Estes autores detalham as três gerações, onde abordam que a segunda geração de SIG foi concebida para operar como banco de dados geográfico (banco de dados onde os dados possuem atributos descritivos e uma representação geométrica no espaço geográfico). Para melhor compreensão sobre o estado atual e perspectivas veja CÂMARA & MEDEIROS (1996) e INPE/DPI (2003a).

O SPRING é um aplicativo de geoprocessamento e, pela forma que vem sendo disponibilizado, tem contribuindo para a difusão desta tecnologia no país e no exterior, uma vez que, oferece um conjunto integrado de ferramentas para processamento de informações geográficas, com modelagem digital do terreno, análise espacial e tratamento de imagens de satélite. Além disto, vem apresentando resultados coerentes com a realidade na utilização como SIG aplicado em projetos ambientais, inovando com metodologias promissoras para análise espacial. Resumidamente, são características do *software* SPRING, segundo INPE (2003a):

- *Opera como um banco de dados geográfico sem fronteiras, mantendo a identidade dos objetos geográficos ao longo de todo banco;*
- *Administra dados vetoriais e matriciais, realizando a integração de dados de Sensoriamento Remoto num Sistema de Informações Geográficas.*
- *Utiliza um modelo de dados orientado-a-objetos, que melhor reflete a metodologia de trabalho de estudos ambientais e cadastrais.*
- *Adaptado a complexidade dos problemas ambientais, que requerem uma forte capacidade de integração de dados entre imagens de satélite, mapas temáticos e cadastrais e modelos numéricos de terreno.*
- *Provê um ambiente de trabalho interativo para visualizar, manipular e editar imagens e dados geográficos, além de linguagem espacial facilmente programável.*

Destas, vale ressaltar a linguagem de programação denominada LEGAL (*Linguagem Espacial para Geoprocessamento Algébrico*), utilizada neste trabalho no processamento digital de imagens. A interface por linguagem de programação do SPRING (LEGAL) é uma ferramenta que possibilita a realização de análises espaciais<sup>26</sup> através de álgebra de mapas, permitindo operações de consulta e manipulação espacial dos dados.

No tocante à assistência ao analista, vale ressaltar que o Setor de Atendimento ao Usuário do INPE (ATUS/INPE), presta auxílio de maneira rápida, objetiva e eficiente via correspondência eletrônica e *internet*, sempre que solicitado e/ou quando o tutorial não se mostra suficiente para a compreensão de tópicos conceituais, de estruturação de dados e execução de rotinas.

Entretanto, a disponibilidade de *download* do aplicativo, de atendimento as dúvidas, de tutoriais e vasta bibliografia na área de Geoprocessamento e Sensoriamento Remoto distribuídos livremente pelo INPE, não dispensam a postura crítica e científica do operador diante dos resultados encontrados frente aos procedimentos metodológicos empregados; assim vale lembrar RAMOS (1999), ao afirmar que “os resultados obtidos só se tornam relevantes quando adequadamente interpretados”.

---

<sup>26</sup> A análise espacial utiliza os atributos espaciais e não espaciais das entidades gráficas armazenadas na base de dados espaciais para fazer simulações sobre os fenômenos do mundo real (INPE/DPI, 2003a).

## CAPÍTULO 3 – MATERIAIS E MÉTODOS

O presente capítulo aborda os procedimentos relativos ao processamento digital de imagens (PDI) para a classificação temática e oferece um suporte significativo ao objetivo maior desta pesquisa. Outro aspecto relevante, o emprego do geoprocessamento na caracterização dos índices físicos, no levantamento e na sistematização de informações da área, não é abordado diretamente neste capítulo, limitando-se à apresentação dos resultados<sup>27</sup>. No que se refere ao processamento digital de imagens, este trabalho tem por prática de ação uma estreita relação com moradores da região analisada e com técnicos de organismos governamentais, visando apresentar informações fidedignas correspondentes ao período histórico da imagem e base cartográfica utilizada. Esta prática de ação, importante para os produtos finais obtidos, apresenta-se também, riquíssima para o processo de (re)conhecimento da realidade pelos habitantes locais. Dela podemos destacar que o levantamento de informações complementares (material colateral) é significativo para a correta interpretação da imagem orbital. Entretanto, a discussão e a análise desta prática participativa foge do escopo do presente trabalho.

O fluxograma apresentado na Figura 19 detalha sequencialmente as etapas percorridas para a obtenção dos resultados ou saída de informações (índices físicos e mapas temáticos). Nesta figura, a parte superior indica a etapa inicial, seleção da área de estudo, seguida dos levantamentos de dados e informações desta, nos seus diferentes níveis de abordagem, permitindo a obtenção dos materiais colaterais (práticas de cultivo, calendário agrícola, aptidão dos cultivares, produtividade, área plantada, insolação, precipitação, levantamentos EICOs, registro fotográfico, entre outros) que, apoiados pelos pontos amostrados e registrados via o GPS, fundamentam todo o processamento digital e classificação de imagem aplicados.

---

<sup>27</sup> Item 4.1.

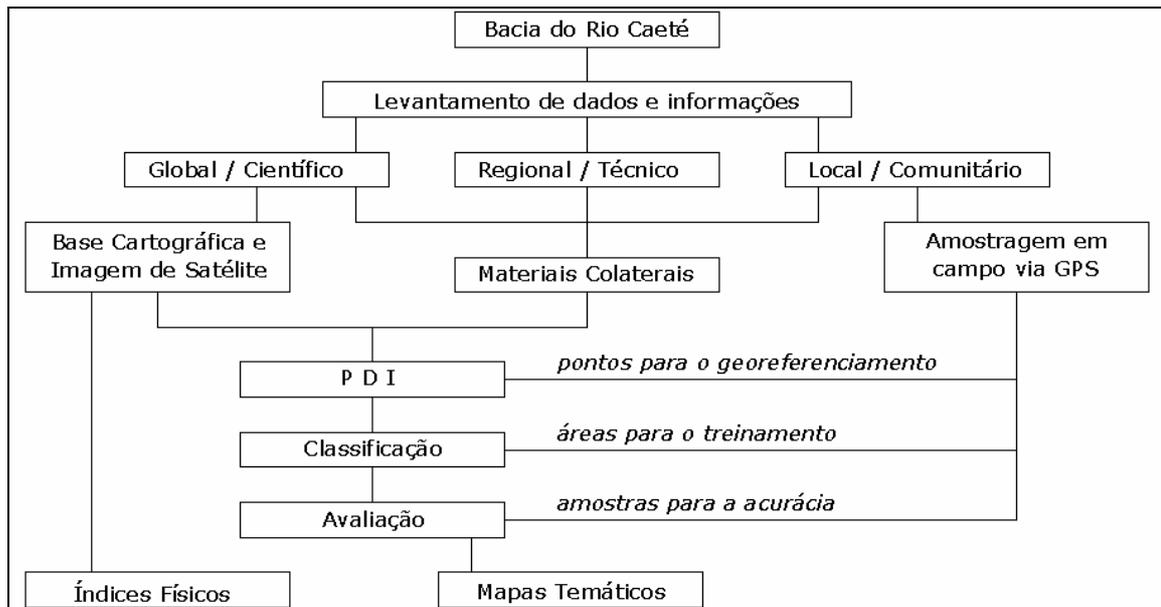


Figura 19 – Fluxograma da pesquisa.

### 3.1. MATERIAIS

A presente pesquisa conta com a utilização de aplicativos computacionais disponibilizados via *internet*, de domínio público, caracterizados por interface amigável, compreensível e difundida pela comunidade científica da área do Sensoriamento Remoto e Geoprocessamento com conhecimentos básicos da Ciência da Geoinformação. Por isto, os recursos financeiros disponíveis no decorrer da pesquisa foram investidos na aquisição de equipamentos de processamento mais velozes e potentes, a fim de facilitar as operações em ambiente computacional.

#### 3.1.1. FONTE DE DADOS

A pesquisa aqui apresentada tem como fonte dados e informações:

- base cartográfica em meio digital na escala 1:50.000;
- produto orbital do sensor ETM<sup>+</sup> (*Enhanced Thematic Mapper Plus*), do satélite Landsat-7; e
- relatórios e documentos técnicos relevantes à área de estudo.

A **base cartográfica** do município de Alfredo Wagner é um produto disponível em formato digital (VIECILI, 2002), obtida por vetorização das feições em tela (*heads-up*), sendo utilizadas 5 cartas topográficas integrantes da série de levantamentos 1:50.000 do Mapeamento Sistemático Brasileiro, na projeção Universal Transversa de Mercator (UTM), produzidas pela

FIBGE. Nesta base cartográfica estão compiladas as informações básicas de drenagem, sistema viário, altimetria e localidades. Além do emprego para o registro da imagem ao mapa, neste trabalho a base cartográfica foi utilizada em campo para dirimir dúvidas quanto à localização dos pontos e posicionamento das amostras (manchas) das classes temáticas.

O **produto orbital** utilizado para a classificação temática foi a imagem digital do sensor ETM<sup>+</sup> (*Enhanced Thematic Mapper Plus*), do satélite Landsat-7, sendo a cena obtida em 10 de março de 2002, referente à órbita 220, ponto 079, quadrante C, com calibração geométrica e radiométrica aplicadas (Nível 1G: imagem com correção do sistema). Adquiriu-se as bandas 1 a 5, 7 e 8 (pancromática) da referida cena, junto ao Banco de Imagens gerenciado pelo Setor de Atendimento ao Usuário do INPE (ATUS/INPE) da Divisão de Geração de Imagens (DGI/INPE).

Demonstrou-se imprescindível a consulta a **documentos e relatórios técnicos** que caracterizam especificamente a sub-bacia do Caeté, além de outros, com menor detalhamento, em nível municipal, regional e estadual que qualificam área de estudo quanto à produção e aptidão agrícola, recomendação de cultivares, calendário de cultivos entre outras informações da agricultura e da sociedade local. Também foram realizadas **visitas técnicas** aos principais organismos governamentais e atuantes na área de estudo, com o objetivo de conhecer e obter dados e informações de interesse ao estudo proposto.

### 3.1.2. EQUIPAMENTOS

Os equipamentos empregados na realização deste trabalho foram os seguintes:

- PC, 512Mb de memória RAM, processador P4 2000MHz, disco rígido 20Gb e monitor de 19 polegadas;
- Computador portátil, 256Mb de memória RAM, processador PII 360MHz, disco rígido 10 Gb;
- Aplicativo *SPRING for Windows*, versão 3.4 e 3.5;
- GPS Garmin 12 modelo Etrex<sup>28</sup> e *software* TrackMaker para conexão com o PC;
- Bússola de bolso;
- Prancheta de anotações;
- Máquina fotográfica digital;
- Veículo/Automóvel.

---

<sup>28</sup> Segundo o fabricante a precisão estimada é de 15m (GARMIN, 1999).

### 3.2. METODOLOGIA – PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGEM

Para a classificação temática do uso e cobertura do solo proposta, independente do método utilizado, o processamento digital aplicado nas imagens pode ser resumidamente descrito em três fases: 1) **fase de pré-processamento**: registro da imagem (correção geométrica), eliminação de ruídos e atenuação dos efeitos atmosféricos (correção radiométrica); 2) **fase de realce**: ajuste de contraste (realce) e atenuação dos efeitos topográficos (transformações multiespectrais); e 3) **fase de classificação**: treinamento e classificação (supervisionada, não supervisionada e visual). Estas 3 fases são complementadas por uma etapa de avaliação, que consiste na operação de tabulação cruzada para elaboração de matrizes de erros, derivando os coeficientes de concordância Kappa. Na Tabela 9 encontra-se uma síntese destas fases, que estão detalhadas nos sub-itens a seguir.

Outro aspecto relevante remete à análise estatística das imagens, que fundamentam as operações e técnicas utilizadas nas fases acima descritas. Entretanto não é abordado na metodologia, limitando-se apenas a apresentação de seus resultados no início do item 4.2.

**Tabela 9 – Fluxograma das etapas para a classificação temática.**

1. Base de Dados		
1.1. Base Cartográfica (1:50.000)	1.2. Imagem Orbital (Landsat-7 ETM <sup>+</sup> )	
2. Processamento Digital de Imagem		
2.1. Pré-Processamento		
2.1.1. Correção Geométrica		
2.1.1.1. Registro		
2.1.1.2. Reamostragem		
2.1.2. Correção Radiométrica		
2.1.2.1. Restauração		
2.1.2.2. Correção Atmosférica		
2.2. Realce		
2.2.1. Realce de Contraste		
2.2.2. Transformações Multiespectrais		
2.2.3. Composições Coloridas		
2.3. Classificação		
2.3.1. MaxVer	2.3.2. IsoSeg	2.3.3. Visual
2.4. Avaliação da Classificação		
2.4.1. Coeficiente de Concordância Kappa		
<p>Obs.: Níveis na mesma linha: indica que o procedimento da etapa é independente aos de níveis de ordem igual (mesma linha).</p> <p>Níveis em linhas diferentes: indica que o procedimento é seqüencial, ou seja, a operação da linha inferior depende da conclusão da operação/técnica da linha superior.</p>		

### 3.2.1. PRÉ-PROCESSAMENTO

Nesta fase contemplam-se duas grandes etapas iniciais para a classificação temática: a **Correção Geométrica** e a **Correção Radiométrica** da imagem. Na primeira etapa são efetuados o **Registro da Imagem** e a **Reamostragem**, tendo como resultado alterações na geometria da cena. A segunda etapa aborda a **Restauração da Imagem** e a **Correção Atmosférica** conferindo mudanças na resposta radiométrica dos alvos da cena devido a atenuação dos efeitos da atmosfera.

#### 3.2.1.1. Correção Geométrica

Os dados do sensor ETM<sup>+</sup> do Landsat-7, disponibilizados nas condições descritas no item 3.3.3., caracterizam o produto orbital como previamente processado, ou seja, “com correção do sistema”, uma vez que, nas imagens já foram aplicadas correção radiométrica e correção geométrica. Entretanto, tais correções referem-se especificamente a cena (220) da órbita (079) segundo a geometria de imageamento do Landsat-7, o que implica na presença de erros da ordem de 100 metros quando sobreposto à base cartográfica 1:50.000 da área de estudo. Neste sentido, para este tipo de produto, seguindo as recomendações de D’ALGE (1997), é aplicado um modelo polinomial para o registro da imagem buscando o refinamento da correção geométrica em ambiente SIG.

##### 3.2.1.1.1. Registro de Imagens

Inicialmente é necessário efetuar o **Registro de Imagens** para a correção geométrica das bandas espectrais como fase de pré-processamento.

A etapa de **Registro de Imagem** corresponde a determinação da relação entre o sistema de coordenadas geográficas da base cartográfica (X, Y) e a imagem (linha, coluna) remotamente registrada de acordo com a função polinomial adotada. Isto requer a definição e identificação de coordenadas (X, Y) do mapa e suas respectivas localizações na imagem (linhas e colunas), denominadas pontos de controle para o registro. Tais pontos “amarram” a imagem ao mapa segundo uma transformação polinomial, que necessita minimamente 3, 6 e 10 pontos de controle respectivamente para uma função polinomial de 1<sup>o</sup>, 2<sup>o</sup> e 3<sup>o</sup> grau.

O controle da qualidade do registro deve ser feito avaliando-se os erros dos pontos de controle e de teste. Na metodologia adotada, são aceitos erros inferiores a 1,5 *pixel* (37,50 metros no terreno) para os pontos de controle.

Em suma, esta etapa visa o “casamento” da imagem orbital em relação à base cartográfica (referência), possibilitando assim, a integração das informações extraídas da imagem de Sensoriamento Remoto com outros dados, espacializados nos planos de informação.

### **3.2.1.1.2. Reamostragem**

A **Reamostragem das Imagens** é realizada para a correção geométrica das imagens como etapa da fase de pré-processamento.

Na fase de registro da imagem são testados os polinômios de 1º, 2º e 3º para fazer o registro dos pontos da base cartográfica com a imagem. Em seguida são avaliados os EMQ de cada ponto de controle e do conjunto final destes. Posteriormente, nesta fase, de reamostragem dos *pixels* da imagem são testados dois métodos: interpolador por vizinho mais próximo e interpolador bilinear.

### **3.2.1.2. Correção Radiométrica**

Conforme já foi abordado, a Correção Geométrica resulta em alterações na geometria da cena, e, a **Correção Radiométrica** confere mudanças nos níveis de cinza (resposta espectral) da imagem original. Entretanto, a alteração na resposta radiométrica dos alvos é de maior complexidade em relação as correções na geometria do imageamento, já que depende das condições da atmosfera na data de registro da imagem e do funcionamento dos instrumentos do sistema sensor. Assim, enquanto as fontes de erros geométricos requerem uma correção para toda a cena, as alterações radiométricas são específicas segundo a natureza da distorção. Disto resulta que as técnicas de correção radiométrica devem ser aplicadas com maior cautela e em regiões específicas da cena de acordo com a fonte da distorção, espalhamento atmosférico e ruídos provenientes do funcionamento de equipamentos do sistema sensor.

Tendo em vista que as imagens de satélite utilizadas no presente trabalho possuem como “nível de correção sistemática 1G”, qualificando assim o produto orbital como “calibrado radiometricamente”, e que as operações de correções envolvendo os níveis de cinza devem ser criteriosamente aplicadas em função de aspectos específicos referentes à data do imageamento, são utilizadas técnicas cosméticas consagradas de Restauração da Imagem e Correção da Atmosfera envolvendo toda a cena e, diminuindo assim o risco de degradação dos dados originais.

### 3.2.1.2.1. Restauração da Imagem e Eliminação de Ruídos

Com a aplicação de técnicas de restauração é possível melhorar a resolução efetiva do sensor até certo nível, corrigindo distorções ópticas introduzidas pelo sensor no processo de geração da imagem digital. Tais técnicas são recomendadas para serem aplicadas sobre os dados originais, sem qualquer tipo de processamento que altere as características radiométricas como as operações de realce. Neste sentido é testada, sobre os dados originais, a aplicação de filtros lineares.

### 3.2.1.2.2. Correção Atmosférica

Para finalizar a etapa de **Correção Radiométrica** e assim, concluir a fase de pré-processamento, é necessária uma avaliação dos níveis de cinza para cada banda espectral a fim de compreender e minimizar os efeitos de degradação devido à influência do espalhamento atmosférico.

A presença da atmosfera afeta o sinal registrado pelos detectores a bordo de satélites influenciando a magnitude da resposta espectral dos alvos e de suas características. As técnicas de correção atmosférica buscam reduzir o efeito da interferência atmosférica sobre os valores de nível de cinza registrados numa cena. Este efeito resulta do espalhamento de moléculas e partículas, bem como da absorção de gases na atmosfera.

A partir da definição dos valores mínimos dos níveis de cinza de cada banda é executada a correção dos efeitos da atmosfera. A subtração destes valores é realizada em ambiente SPRING, através da *Linguagem Espacial para Geoprocessamento Algébrico* (LEGAL).

## 3.2.2. REALCE

Após realizada a etapa de **Pré-Processamento de Imagens** (correção geométrica e radiométrica) são realçadas as imagens utilizando as técnicas de realce de contraste, razão entre bandas, transformação IHS e as composições coloridas.

### 3.2.2.1. Realce de Contraste

O **realce de contraste**, também denominado **realce radiométrico**, consiste numa transferência radiométrica em cada “*pixel*” e realiza-se através da operação ponto a ponto, independentemente da vizinhança (o novo valor do ponto depende só do valor antigo deste ponto). Nesta técnica apenas o valor do nível de cinza do *pixel* é alterado, como resultado da aplicação de um tipo de transformação.

No caso presente é aplicada uma função de transformação do tipo *contraste linear* a fim de redistribuir, linearmente aos extremos, os níveis de cinza da imagem sem alterar o formato do histograma de entrada.

### 3.2.2.2. Transformações Multiespectrais

As *transformações multiespectrais* testadas são: operações aritméticas de divisão, transformação IHS e composições coloridas.

#### 3.2.2.2.1. Razão entre Bandas

Para a correção (atenuação) dos efeitos da topografia é empregado o método de **razão entre bandas**, através de regras matemáticas implementadas no *software*, sendo testadas as operações de divisão (razão) entre as bandas 3, 4 e 5 envolvendo: a) a média dos níveis de cinza de duas bandas; b) um fator de Ganho (multiplicativo); e c) *offset* (aditivo); permitindo assim a compressão dos dados de duas bandas numa única imagem.

#### 3.2.2.2.2. Composições de Bandas

Concluída a fase de realce das imagens são testadas combinações entre bandas para elaboração de composições coloridas no sistema RGB com poder discriminatório visual para as classes temáticas de interesse.

A seleção das bandas e das cores para a composição colorida carece atenção, uma vez que está diretamente relacionada com a resposta espectral dos alvos e as cores são resultantes da seqüência em que tais bandas são atribuídas nos canais RGB. A informação contida na composição de três bandas é sempre a mesma, independente do canal de cor a que cada banda é atribuída. Entretanto em função da banda colocada em cada canal, teremos diferentes “percepções visuais” da composição colorida de acordo como foram relacionadas com os canais de cores do sistema RGB.

Quanto à definição das cores do sistema RGB para a elaboração colorida, é considerado o resultado que proporcionar melhor “percepção visual” para o analista, ou seja, a análise será subjetiva.

#### 3.2.2.2.3. Transformação IHS

Para aumentar a resolução espacial das bandas espectrais é realizada a **transformação RGB-IHS** e **IHS-RGB** como técnica de fusão destas com a banda pancromática, a fim de permitir a extração visual de amostras de treinamento, para a interpretação visual com maior nível de detalhamento.

### 3.2.3. CLASSIFICAÇÃO

A classificação temática para o mapeamento do uso e cobertura do solo, é realizada por intermédio de 2 técnicas de reconhecimento de padrões, que são avaliadas em relação aos resultados da interpretação visual. A seguir descreve-se a metodologia empregada nas técnicas de classificação supervisionada via algoritmo MaxVer (*pixel a pixel*) e não supervisionada via algoritmo IsoSeg (*por regiões*).

#### 3.2.3.1. Classificador MaxVer

A análise digital, utilizando o classificador supervisionado MaxVer implementado no SPRING, considera os parâmetros estatísticos e a informação espectral de cada *pixel* isoladamente a fim de encontrar regiões homogêneas.

Conforme preconizado pela literatura, na classificação supervisionada é necessário um conhecimento prévio da área e dos alvos contidos nesta. Assim, a partir das informações obtidas nas visitas técnicas e das amostras das classes temáticas identificadas nos levantamentos de campo é possível fundamentar as operações computacionais requeridas nesta técnica de classificação.

Concluídos os levantamentos e a fundamentação da classificação é realizado o **treinamento**, a partir das amostras de campo, e a **classificação**, a partir dos parâmetros estatísticos extraídos das amostras delimitadas no treinamento. Para finalizar a aplicação deste algoritmo, é necessário testar os **limiares de aceitação** que visam indicar o rigor da classificação.

Baseada no Tutorial do aplicativo Spring, a seqüência lógica das operações realizadas para a classificação *pixel a pixel* é a seguinte:

***Criar o arquivo de Contexto** – armazenamento das bandas que farão parte do processo de classificação, o método utilizado (*pixel a pixel*) e as amostras;*

***Executar o treinamento** – amostragem das classes temáticas sobre a imagem;*

***Analisar as amostras** – verificação da validade das amostras coletadas;*

***Executar a Classificação** – classificação de acordo as informações descritas no arquivo de contexto;*

***Executar o Mapeamento para Classes** – conversão da imagem classificada (categoria Imagem) para um mapa temático raster (categoria Temática); e*

***Executar uma Pós Classificação** – edição matricial para correção de possíveis erros da classificação.*

### 3.2.3.2. Classificador IsoSeg

Os métodos de classificação não supervisionados implementados no *Spring 3.5*. (INPE/DPI, 2003a) comumente utilizados são: **K-médias** (*pixel a pixel*) e **IsoSeg** (*por regiões*). Tendo em vista que a aplicação via MaxVer, proposta no item anterior, é do tipo *pixel a pixel*, como segunda técnica de classificação digital é empregado o algoritmo *por regiões* IsoSeg, com o objetivo de avaliar sua performance discriminatória além de possibilitar alternativas a fim de superar a onerosa busca de *pixels* puros nas amostras de treinamentos requisitada na classificação MaxVer.

O processo de **segmentação** rotula inicialmente cada "*pixel*" como uma região distinta. A partir do limiar de similaridade, efetua-se um teste de hipótese estatística que avalia a média entre as regiões, calculando o grau de similaridade para cada par de região adjacente espacialmente e comparando com o valor definido pelo usuário. Testada a similaridade entre as regiões, divide-se a imagem em um conjunto de sub-imagens e então realiza-se a união entre elas, de acordo com o limiar de agregação previamente definido.

A estratégia a ser adotada na segmentação estabelece grupos de pares de limiares (similaridade e área mínima), com a finalidade de facilitar a investigação dos resultados destes pares de combinações, de acordo com os patamares de limiares estipulados.

Na etapa de **classificação digital** são delimitados conjuntos de regiões considerando atributos estatísticos a partir da imagem segmentada. Então define-se um **limiar de aceitação** para a classificação dos temas que determinam o rigor da delimitação das classes. O produto gerado é uma *imagem classificada*, resultante do agrupamento das regiões, de acordo com os parâmetros de similaridade, área mínima e aceitação.

De forma análoga à utilizada na avaliação dos limiares de aceitação da classificação MaxVer, é adotada uma estratégia na classificação IsoSeg, diferindo apenas pelo fato de que a primeira admite o limiar de aceitação de 100% enquanto a segunda não.

Da imagem classificada inicia-se o **mapeamento temático** das classes geradas na classificação digital para as 5 categorias (temas) da legenda definida no *Modelo de Dados*. O resultado da etapa é a transposição de uma *imagem classificada* para uma *imagem temática* passível de conversão para o formato vetorial.

Neste sentido, a etapa de mapeamento temático requer a intervenção do analista. Enquanto na técnica MaxVer as classes são geradas "automaticamente" a partir das amostras de treinamento, bastando ao analista atribuí-las segundo a legenda temática; na técnica IsoSeg as

classes geradas<sup>29</sup> devem ser identificadas (se possível em campo) pelo analista, uma vez que este não definiu nem o número nem quais classes o algoritmo deve classificar.

A última etapa da classificação IsoSeg é a edição matricial, que visa corrigir possíveis confusões das classes e complementar as áreas não classificadas em virtude do limiar de aceitação adotado. Uma *imagem classificada* é tanto a informação de entrada quanto a de saída desta etapa denominada de **pós classificação**.

### 3.2.3.3. Classificação Visual

Na análise visual as informações são extraídas com base na inspeção visual da imagem, através de processos dedutivos. Parte-se do geral para o específico, apoiando-se em informações consuetudinárias.

A *classificação visual* utiliza técnicas de fotointerpretação, requerendo intensamente a intervenção do usuário para o agrupamento e classificação das feições da imagem. Esta classificação considera a convergência de evidências em relação aos elementos (características) fotointerpretativos como: tonalidade/cor e textura (aspectos espectrais); tamanho, forma, distribuição e associação das classes (aspectos espaciais).

Para distinguir as classes previamente definidas na legenda temática utiliza-se como método a interpretação visual da composição colorida<sup>30</sup>, envolvendo dois procedimentos de interpretação, a fase de leitura (identificação dos pontos amostrados) e a fase de análise (relação entre os alvos e as 5 classes temáticas).

É necessária a utilização de material colateral sobre a área para aprimorar a interpretação dos dados da composição colorida. Considera-se relevante, para o presente estudo, as informações relacionadas ao clima, tipo de solo, forma do relevo, calendário agrícola e práticas de cultivo da região.

### 3.2.3.4. Pós Classificação

Na etapa de pós classificação é empregada a edição matricial, com fins de correção de pontos duvidosos e/ou não classificados, visando aprimorar a aparência visual dos resultados das classificações (imagem classificada). Através da dissociação e associação das regiões não

---

<sup>29</sup> As classes geradas são oriundas do processo de extração de regiões da *imagem segmentada*.

<sup>30</sup> A composição colorida utilizada contempla as qualidades radiométricas das bandas 3, 4 e 5 otimizadas ainda pela qualidade geométrica da banda 8.

classificadas da imagem, inserem-se rótulos aos pontos duvidosos, de acordo com o contexto espacial e com auxílio da ferramenta *acoplamento de tela* disponível no Spring.

Concluída a edição matricial, as imagens apresentam todos os *pixels* (100%) classificados à uma das 5 classes temáticas. Então, é realizada a uniformização dos temas (classes obtidas) por intermédio de filtros lineares, capazes de suavizar os dados (dar aspecto de homogeneidade), fornecendo maior legibilidade aos resultados.

Após realizar a edição matricial e as operações de filtragem, as imagens resultantes são transformadas para planos de informações do tipo temático, permitindo a visualização tanto na forma de imagem (matricial) quanto temática (vetorial).

### **3.2.4. AVALIAÇÃO DA CLASSIFICAÇÃO**

Para avaliar a confiabilidade das diferentes técnicas de classificações temáticas contempla-se: 1) a análise visual; 2) a análise de parâmetros estatísticos; e 3) a estimativa da acurácia. As duas primeiras permitem avaliar apenas um mapa temático isoladamente. A terceira, por sua vez, possibilita a avaliação da concordância entre dois mapas temáticos.

Neste sentido, são empregadas técnicas de avaliação quantitativa (análise de parâmetros estatísticos) e qualitativas (análise visual e estimativa da acurácia), ambas vinculadas à escala adotada.

#### **3.2.4.1 Coeficiente de Concordância Kappa**

A estimativa da acurácia visa categorizar os resultados produzidos, por intermédio do coeficiente de concordância Kappa, permitindo qualificar a confiabilidade das classificações de acordo com as tabelas de referência (Tabela 8). O método utilizado para comparar as medidas de exatidão de cada classificação consiste em relacionar o coeficiente de concordância com os intervalos de valores das tabelas empíricas de referência de Landis & Koch (1977) e Fleiss (1981).

Para isto é efetuada a operação de *Tabulação Cruzada*, implementada no Spring, resultando em uma lista da área em comum entre duas classificações, permitindo assim a elaboração de uma matriz de erro.

Nas colunas desta matriz são representados os dados de referência (verdade terrestre) e nas linhas são indicados os dados da classificação em análise. Da diagonal principal desta matriz resulta a concordância entre estes dois grupos de dados (Exatidão Geral), e da divisão da soma dos elementos da diagonal principal pelo número total de amostras tomadas estima-se a

Exatidão Global. A matriz de erros possibilita ainda, além da exatidão global, o cálculo do índice de concordância Kappa **para as classificações**.

A matriz de erro permite também a determinação da exatidão **para cada classe temática**, ao indicar o percentual da amostra de referência classificada corretamente. O cálculo é feito segundo o formulário apresentado no item 2.2.4.1. Desta análise obtêm-se a medida da Exatidão do Produtor e da Exatidão do Usuário. De cálculo análogo ainda podem ser estimados os Erros de Omissão e os Erros de Inclusão.

### **3.3. CONSIDERAÇÕES PERTINENTES**

A interpretação e delimitação das classes temáticas deve considerar certas características identificáveis na imagem como: textura, tamanho, forma, sombra, tonalidade e cor dos alvos da superfície terrestre que foram abordadas na revisão da literatura, especificamente no item 2.2.3.3. Tais características, conforme já discutido, são aplicáveis na interpretação de fotografias aéreas e de forma semelhante para as imagens de sensores orbitais. Entretanto, além dessas características, existem outros fatores que contribuem para o êxito da análise de imagens de satélite, os quais estão, segundo Moreira (2003), estreitamente relacionados aos *dados coletados* (época de obtenção das imagens, tipo de produto, bandas espectrais, escala da imagem) e ao *fotointérprete* (experiência do analista).

#### **3.3.1. A ESCALA DE TRABALHO**

A definição da escala de trabalho<sup>31</sup> considera o nível de detalhamento desejado e a finalidade da aplicação dos resultados – neste caso, a modelagem da erosão hídrica. Outros fatores relevantes são as limitações das informações da base cartográfica (desatualizada em mais de 20 anos) bem como sua escala nominal, as limitações do satélite (resolução espacial do sensor) e as dimensões das áreas de cultivo agrícola (entre 1ha e 2ha em média por propriedade).

A escala de trabalho utilizada em campo é 1:50.000. A escala de interpretação visual é a 1:25.000, sendo utilizados recursos de *zoom* que possibilitam visualizações até as escalas 1:10.000 e 1:5.000. Esta estratégia adotada visa a identificação das classes temáticas e a

---

<sup>31</sup> De acordo com Moreira (2003) a escala de trabalho nada mais é do que uma ampliação ou redução da imagem, sem modificar o seu conteúdo radiométrico, ou seja, o fato de se fazer uma ampliação numa área de estudo, por exemplo da escala 1:250.000 para 1:100.000, não quer dizer que os alvos que antes não eram individualizadas dentro do *pixel* passam a ser distintos na nova escala.

redução dos erros na sua delimitação. Para saída de resultados, a escala 1:100.000, é mais condizente para a área de estudo ao considerar o nível de detalhamento existente e a descontinuidade das variáveis utilizadas pelos modelos de erosão.

De acordo com PEDREIRA & SANTOS (1999), a escolha da escala mais adequada para a realização de um trabalho é tarefa muito difícil e depende, além da subjetividade do analista, de vários fatores, dentre eles a valorização ou perda de informações de acordo à escala utilizada relativamente à finalidade do trabalho. Os autores pontuam que *“não existe uma escala única correta para descrever populações, ecossistemas ou paisagens; o que não significa, entretanto, que não haja regras gerais quanto à escala, mas sim que elas devem ser avaliadas com muito cuidado”*.

Para atingir o nível de detalhe necessário para o mapeamento é fundamental traçar as relações entre as técnicas empregadas, a escala de trabalho e a saída das informações. Pois para RANIERI (1996) *apud* Pedreira & Santos (1999) *“numa determinada seleção de escala pode-se estar, muitas vezes, perdendo informações importantes, utilizando um mapa pouco detalhado ou, ao contrário, detalhando demasiadamente um mapa que, em seguida, será reduzido, agrupando ou mesmo perdendo as informações que já foram levantadas”*. Concluem afirmando que todos os levantamentos possuem suas limitações inerentes e o maior problema é a tomada de decisões políticas e econômicas que venham a ignorar estas limitações.

No caso presente, os erros cartográficos oriundos dos métodos utilizados na produção dos mapas são aceitáveis para as finalidades do trabalho proposto. Vale lembrar que a utilização dos resultados aqui obtidos possui caráter científico e acadêmico, não passíveis de aplicação para outros fins.

### **3.3.2. ÉPOCA DE OBTENÇÃO DAS IMAGENS**

Com muita propriedade, ROSA (1990) afirma que um dos fatores que deve ser levado em consideração na classificação de imagens digitais é a época de tomada das imagens. Neste sentido, no presente estudo, a data de aquisição de imagens coincide com o período de colheita, referente ao período de pleno desenvolvimento da cultura do milho (classe E, cultivo). Nesta época observa-se que a cultura do milho é caracterizada pela intensidade máxima de atividade fotossintética, evidenciando sua resposta espectral em relação as demais classes da área e permitindo assim sua separabilidade. A partir da análise do acervo de imagens do Landsat disponíveis no Departamento de Geração de Imagens do INPE, através do sítio <http://www.dpi.inpe.br/cdteca>, selecionou-se os produtos orbitais de maior visibilidade de cena,

ou seja, com o menor percentual de cobertura de nuvens<sup>32</sup> durante a época de colheita do milho (maior desenvolvimento vegetativo). Este período remete aos meses de março e abril, segundo o calendário agrícola da região. A interferência da cobertura de nuvens na resposta radiométrica de acordo com as bandas espectrais é abordada no item seguinte.

Uma das hipóteses consideradas no processamento digital de imagens é a de que, entre a época da passagem do sensor (captura da imagem) e os levantamentos de campo, as mudanças ocorridas quanto à cobertura do solo foram desprezíveis e as alterações de uso do solo foram moderadas, estando relacionadas ao calendário agrícola da região. A diferença temporal entre a tomada da imagem de satélite (10/03/2002) e os levantamentos de campo (maio e novembro de 2003) para registro de pontos amostrais é justificada com base nas informações complementares obtidas durante as visitas técnicas, entrevistas e saídas a campo. De posse destas informações e apoiado no calendário agrícola é possível decifrar a sazonalidade das culturas da região.

### **3.3.3. TIPO DE PRODUTO**

O mapeamento temático detalhado do uso do solo realizado exclusivamente por levantamentos em campo ou por fotografias aéreas é oneroso em termos práticos, para a área de estudo em questão, além de envolver custos relativamente elevados. O levantamento de informações de campo têm a restrição muitas vezes de acesso e dificuldade de deslocamento na área. Já as fotografias aéreas para área de estudo têm como principal limitação a falta de periodicidade de informações, agravada pela dinâmica inerente às áreas agrícolas, além de serem datadas à décadas atrás. Tanto os levantamentos de campo quanto as fotografias aéreas existentes para área de estudo representam informações complementares, sendo os dados digitais obtidos por sensoriamento remoto orbital a base de informações para a classificação temática proposta no presente trabalho.

Loch (2000) expõe que são diversas as opções de sensores remotos atualmente, ficando um tanto difícil escolher um sensor apropriado para uma determinada tarefa. Para a autora é raro existir um único sensor com características ideais para um problema específico.

Já GIBSON & POWER (2000) *apud* GÜRTLER (2003) discutem que quando se trata de monitoramento ambiental, as resoluções espaciais e temporais necessárias dependem da aplicação do trabalho e frequência de atualização requerida. Para os autores o monitoramento

---

<sup>32</sup> Segundo FAO (1996) é essencial que as imagens contenham baixa ou nenhuma cobertura de nuvens, não devendo exceder 10% da cena.

de culturas agrícolas requer detalhamento espacial e frequência de atualização semanal ou mensal. Neste contexto, apontam as imagens obtidas pelo satélite Landsat como as mais indicadas, pois possuem resolução espacial de 30 metros para as bandas do visível e infravermelho próximo e médio com resolução temporal de 16 dias.

ENGESAT (2004) qualifica o Landsat-7 como sendo o satélite mais interessante para aplicações diretas até a escala 1:25.000, em áreas rurais principalmente, mesmo em grandes extensões de território, como acontece freqüentemente no Brasil.

A opção pelo emprego dos produtos digitais do Landsat-7, no presente estudo, considera os objetivos e a finalidade da aplicação, levando em conta a capacidade deste sensor em relação ao poder discriminatório dos alvos terrestres (resolução espacial). Considera-se ainda a performance deste sensor quanto: à resolução espectral (número e comprimento de bandas), à resolução radiométrica (número de níveis de cinza) e a periodicidade de informações disponíveis, ou seja, a disponibilidade de imagens livres de cobertura de nuvens, remetendo à resolução temporal (frequência de imageamento).

São utilizadas no mapeamento temático imagens adquiridas com cobertura de nuvem inferior à 1%, referentes à órbita 220, ponto 79, quadrante C, bandas 3, 4, 5 e 8, com correções geométricas básicas e reamostragem pelo vizinho mais próximo, realizadas pela unidade de processamento de imagens do INPE, em Cachoeira Paulista, SP. A porção da cena (quadrante C) que engloba a área da sub-bacia equivale a 3505 linhas por 3496 colunas com *pixel* 12,5m (banda 8) e 1753 linhas por 1749 colunas para o *pixel* de 25,0m (bandas 3, 4 e 5). As imagens das bandas 3, 4 e 5 foram restituídas para *pixels* de 25x25 metros e a banda 8 (pancromática) para *pixels* de 12,5x12,5 metros pela unidade de Divisão de Geração de Imagens do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (DGI/INPE), que adotou este tamanho de *pixels* para melhorar a visualização destas imagens.

Com muita propriedade, D'Alge (1997) parafraseia que a maioria das imagens adquiridas pelos usuários já possui um certo nível de correção e um sistema de projeção cartográfica, ou seja, o posicionamento relativo dos *pixels* é condizente com um sistema de referência. Segundo o autor, basta ao usuário aplicar um modelo polinomial (registro de imagem) para o refinamento da correção geométrica.

Desta forma, o presente trabalho, embora utilize o **nível de correção sistemática 1G**<sup>33</sup> – qualificando o produto orbital como calibrado radiométrica e geometricamente – necessita de um processo de correção geométrica, uma vez que as imprecisões de posicionamento são da ordem de 100m. Como visto no item 3.2.1.1. as imagens serão ajustadas para a área de estudo, tendo como referência a base cartográfica digital (escala 1:50.000), através da aquisição de pontos de controle desta base, além de informações geográficas dos pontos obtidos nos levantamentos de campo. Esta operação é necessária, apesar das imagens já estarem geometricamente corrigidas, em virtude das imprecisões mencionadas.

### 3.3.4. BANDAS ESPECTRAIS

Tanto para a interpretação visual quanto para as classificações digitais, a seleção das bandas espectrais utilizadas em composição e/ou processamento determinam os resultados da classificação temática. A escolha das bandas apropriadas, utilizadas no processo de classificação, considera os objetivos de aplicação, as faixas espectrais de operação do sensor ETM<sup>+</sup> do Landsat-7 (Tabela 4), bem como as respectivas características derivadas e potencial de aplicação de cada banda, estas descritas na Tabela 5.

Servem de dados de entrada para as classificações digitais realizadas os canais espectrais 3 (visível: vermelho, 0,63–0,69 $\mu$ m), 4 (infravermelho próximo, 0,78–0,90 $\mu$ m) e 5 (infravermelho médio, 1,55–1,75 $\mu$ m), que apresentam resolução espacial análoga (25 metros). A partir destas 3 bandas são executadas as operações aritméticas do tipo *razão entre bandas* e a composição colorida da *imagem sintética*.

A seleção das 3 bandas considera basicamente dois aspectos: a) *características espectrais* de acordo com o objetivo e a finalidade de aplicação do estudo proposto; e b) *análise estatística* de parâmetros relevantes à combinação de imagens.

A banda pancromática (canal 8, visível ao infravermelho próximo, 0,52–0,90 $\mu$ m) com resolução nominal de 15m, entretanto no presente trabalho restituída para 12,5m (DGI/INPE), é utilizada na *transformação RGB-IHS* e *IHS-RGB* visando a fusão com as informações espectrais das bandas 3, 4 e 5. A composição colorida falsa-cor, restaurada para 12,5m,

---

<sup>33</sup> Nível de correção sistemática "1G": também denominada de imagem com correções do sistema, é um nível de correção sistemática onde a imagem é radiométrica e geometricamente calibrada de forma sistemática e associada a um sistema de projeção cartográfica (UTM) e a um datum horizontal (SAD69). As correções de sistema são realizadas nas imagens brutas pelas estações de recepção da Divisão de Geração de Imagens (DGI/INPE) através de algoritmos específicos de correção que modelizam a posição do satélite, considerando parâmetros espaciais (altitude, posicionamento e efemérides do satélite) que são componentes fundamentais usados para a geração de produtos do nível 1G. Essas correções visam minimizar os efeitos decorrentes do ângulo de curvatura da terra, variações na velocidade, altura e altitude do satélite, deslocamentos de órbita entre outros.

representa a imagem de referência a ser utilizada na técnica de interpretação visual para classificação temática.

As bandas espectrais utilizadas neste estudo possuem resolução radiométrica correspondente a 8 *bits* (256níveis) por *pixel*, coincidindo com o número de níveis de cinza suportado pelo sistema aplicativo empregado.

### 3.3.5. EXPERIÊNCIA DO FOTOINTÉRPRETE

O conhecimento deste autor na área de geotecnologias, com relevância para o trabalho aqui apresentado, remete basicamente à dois tipos de estudos: espacialização de bases cartográficas em meio digital e interpretação visual no mapeamento temático do uso do solo.

Quanto a estruturação de bases cartográficas, recomenda-se a leitura dos trabalhos: WEGNER (2000); VIECILI & POMPÊO (2001); VIECILI *et al.* (2002); VIECILI (2002), VIECILI & POMPÊO (2004a) e VIECILI & POMPÊO (2004b). Em todas estas referências o autor colaborou para a conversão e estruturação de bases cartográficas no ambiente digital. Da experiência resultante, aqui contextualizada, salienta-se o conhecimento das estruturas de banco de dados e de representação (vetorial e matricial), de georeferenciamento, de validação topológica, de estruturação de arquivos e de conversão em formatos (extensões).

Quanto a interpretação visual de imagens no mapeamento temático do uso e cobertura do solo, indica-se as pesquisas de SANTA CATARINA (2000a), BRÜGGEMAN (2001), e OLIVEIRA *et al.* (2003) em que o autor da presente pesquisa teve participação assídua na classificação temática. No trabalho de Brüggeman (2001), executou-se a interpretação visual de imagens do sensor TM do Landsat5 no município de Rancho Queimado, SC (limítrofe à leste de Alfredo Wagner) em 4 classes temáticas na escala 1:50.000 para fins de levantamentos do potencial turístico; sendo a pesquisa apoiada pela estrutura física e humana do CIRAM/Epagri, enquanto atividade de estágio extracurricular. Em SANTA CATARINA (2000a) envolve o diagnóstico ambiental da sub-bacia do Coruja-Bonito e, relevante aqui, a interpretação visual de imagens orbitais do Landsat5 no mapeamento temático de 8 classes de uso atual da terra na escala 1:50.000 no município de Braço do Norte (SC). Já em Oliveira *et al.* (2003) realizou-se a interpretação visual de fotografias aéreas para o mapeamento temático de 5 classes de uso e ocupação do solo do Parque Municipal da Lagoa do Peri (Município de Florianópolis, SC) a partir de aerofotos na escala 1:15.000 e de base cartográfica na escala 1:10.000, sendo a pesquisa desenvolvida junto ao NEA/UFSC.

Outro aspecto, considerado aqui de extrema relevância, é o convívio do autor junto à comunidade, tarefa esta que foi viabilizada a partir das pesquisas desenvolvidas no âmbito dos

projetos *Planejamento Participativo de Recursos Hídricos na Região das Nascentes do Rio Itajaí do Sul* (POMPÊO *et al.* 2003) e *Controle de Enchentes e Gestão Ambiental Participativa* (POMPÊO, 2004).

### 3.3.6. DEFINIÇÃO DA LEGENDA TEMÁTICA

A análise das classes e a elaboração da legenda temática utilizada estão adaptadas às condições locais da bacia hidrográfica. A legenda adotada, conforme visto na revisão bibliográfica, não segue fielmente a um sistema de classificação específico.

Após criteriosa análise dos dados levantados e considerando os três níveis de conhecimento (científico, técnico e comunitário), além do apoio das duas saídas iniciais a campo com o objetivo de aquisição de pontos de controle para o registro e coleta de pontos amostrais representativos dos alvos de campo, optou-se pela categorização da imagem em 5 classes temáticas.

Das 5 classes temáticas propostas, basicamente duas são destinadas ao uso: agricultura (cultivo de cebola e milho; classe E – cultivo) e pastagem (classe C – campo); e três de cobertura: silvicultura (espécie florestal *pinnus elliot ssp.* e *pinnus taeda ssp.*; classe D - reflorestamento), solo exposto (classe A – solo), mata atlântica e vegetação em diferentes estágios de regeneração (classe B – mata).

Classes estas relevantes em termos: espectrais (poder discriminatório); finalidade da aplicação (modelagem de erosão hídrica); escala de trabalho (resolução espacial da base cartográfica e do produto orbital utilizado); e data do imageamento. Segue a descrição das 5 classes temáticas de uso e cobertura do solo quanto às características mais relevantes:

#### **Classe Solo – A**

Dentre as cinco classes temáticas propostas e utilizadas para classificação do uso e cobertura do solo no presente trabalho, a classe “solo” é a mais abrangente em termos de complexidade de resposta espectral dos alvos. Pois nesta classe engloba-se o solo exposto ou solo nu, os afloramentos rochosos, as manchas urbanas e os corpos hídricos. Além destas, considera-se nesta classe temática as demais áreas (manchas) de pequenas dimensões, contemplando os alvos que não correspondem a nenhuma das outras 4 classes, como por exemplo as estradas e as pontes.

As manchas de solo exposto ou solo nu (desnudo) compreendem áreas preparadas para o cultivo agrícola, sejam estas utilizadas para cultivo futuro ou mesmo pousio.

Os afloramentos rochosos correspondem as áreas concentradas principalmente nas encostas das serras Geral e da Boa Vista, evidenciando características resultantes dos processos erosivos naturais.

As manchas urbanas compreendem áreas com intenso processo de ocupação antrópica refletindo o uso residencial e comercial. A área urbana do município é representativa e visível nas imagens utilizadas, mesmo sem precisão geométrica para delimitação aguçada.

Os corpos hídricos representam as áreas cobertas com espelho d'água na data do levantamento. Compreende toda a extensão das áreas dos vales de rios e açudes de dimensões representativas.

### **Classe Mata – B**

A classe “mata” remete à Mata Atlântica, agrega a vegetação primária<sup>34</sup>, não diferindo neste trabalho os estágios sucessionais das espécies arbóreas. Neste sentido, compreende todas as formações florestais pioneiras (floresta primária) existentes nesta região específica, com ocorrência de Floresta Ombrófila<sup>35</sup>. É caracterizada pelas áreas ocupadas por vegetação arbórea com alta densidade e grande diversidade de espécies, apresenta dossel fechado, compacto e aspecto homogêneo.

### **Classe Campo – C**

Esta classe incorpora vários estágios de regeneração da vegetação com estruturas e densidades variáveis e áreas plantadas de pastos. Denominada por “campo” refere-se a vegetação secundária<sup>36</sup> contemplando as áreas de campo (“baixo”, “aberto”, “limpo”, “sujo”) e as capoeiras (“capoeirinha”, “capoeira”, “capoeirão”) e pastagens (artificiais/plantadas e naturais). As áreas de campo e capoeira caracterizam a regeneração da vegetação em virtude da prática do pousio, já as áreas de pastagens remetem as gramíneas que destinam-se à alimentação do gado e contribuem para a proteção do solo agrícola.

---

<sup>34</sup> É representada nos mapas de vegetação, como a cobertura vegetal de uma região na sua forma original KLEIN (1978).

<sup>35</sup> De acordo com a classificação de KLEIN (1978), a Floresta Ombrófila é caracterizada por árvores perenifoliadas de alto porte, variando entre 30 e 50 metros de altura, apresentando diversos agrupamentos distintos, elevada densidade e extraordinária heterogeneidade

<sup>36</sup> Segundo KLEIN (1978), podemos definir a *vegetação secundária* como sendo um conjunto de sociedades vegetais que surgem imediatamente após a devastação da floresta ou depois do abandono do terreno cultivado por um período mais ou menos prolongado pelo agricultor, caracterizada por estágios sucessivos, bem demarcados e que tendem a reconstruir a vegetação original. São estágios da vegetação secundária: estágio pioneiro de regeneração; estágio da capoeirinha; estágio da capoeira; estágio do capoeirão.

### Classe Reflorestamento – D

A classe reflorestamento é constituída por áreas ocupadas com plantio uniforme (maciço homogêneo) de espécies florestais exóticas, predominando às espécies *pinnus ellioti ssp.* e *pinnus taeda ssp.*. Caracteriza-se por essências arbóreas plantadas em extensas áreas localizadas na porção superior da sub-bacia, de maneira contínua, o que fornece aspecto homogêneo para esta classe temática.

O cultivo das espécies de coníferas exóticas plantadas para diferentes fins destina-se principalmente ao insumo (matéria prima) para as indústrias de papel e celulose.

### Classe Cultivo – E

A classe “cultivo” ou agricultura refere-se as áreas agrícolas destinadas especificamente ao cultivo do milho, que representa as áreas de lavouras temporárias onde é praticado o cultivo mínimo e/ou o plantio direto.

Para a data do imageamento a cultura do milho caracteriza-se pelo pleno vigor vegetativo das plantas e remete a época inicial da colheita da cultura. Em média são cultivados entre 1 e 2 hectares por propriedade.

Seguindo as classes temáticas acima definidas, apresenta-se as cores adotadas na legenda temática, conforme a Tabela 10.

**Tabela 10 – Classe temática e cor de representação na legenda temática.**

Classe Temática	Cor adotada na legenda
A – Classe Solo	
B – Classe Mata	
C – Classe Campo	
D – Classe Reflorestamento	
E – Classe Cultivo	

### 3.3.7. LEVANTAMENTOS DE DADOS E INFORMAÇÕES

Aqui são apresentadas as estratégias metodológicas incorporadas nos levantamentos de dados e informações pertinentes à esta pesquisa.

Desde o levantamento bibliográfico (referente à análise digital de imagens, bem como todos os procedimentos empregados neste trabalho) até a classificação temática do uso e ocupação do solo, estão embasadas nos fractais: *global, regional e local*; permitindo assim uma análise respectivamente sob as óticas: *científica, técnica e comunitária*.

Este desenvolvimento metodológico apresenta-se estruturado sob a forma de três diferentes níveis de conhecimento e da maneira como são empregados (do geral para o específico), podem facilitar a compreensão da realidade local de acordo com os olhares: do saber científico, dos técnicos atuantes e da comunidade local. Como premissa básica adota-se ainda que, os percursos das análises devem acontecer sempre do nível geral para o específico, o que permite uma aproximação da realidade à medida que as informações são levantadas e detalhadas. A caracterização dos atores envolvidos pode ser compreendida da seguinte maneira:

- nível global (*Internet, Universidades, INPE*);
- nível regional (*Embrapa, Epagri, ICEPA-SC, Comitê da Bacia Hidrográfica do Itajaí*);
- nível local (*Prefeitura Municipal de Alfredo Wagner, Sindicato dos Trabalhadores Rurais, Escritório Local Epagri-AW, comunidade, família e agricultor*).

Para o reconhecimento e compreensão das características da região de estudo são fundamentais, para aproximação da área da sub-bacia do Caeté (partindo de dados gerais até a obtenção de informações específicas), três quesitos, cronologicamente descritos, a saber: 1) os documentos e relatórios consultados; 2) as visitas técnicas realizadas; e 3) os levantamentos expeditos de campo.

#### **Documentos e relatórios consultados**

Os documentos analisados que fundamentaram a revisão de literatura representam as **contribuições científicas** sobre a temática ambiental relacionada ao processamento digital de imagens. Neste sentido foram feitas consultas basicamente nas bibliotecas da UFSC (central e setoriais) e em acervos de instituições via *internet*. Garimpou-se revistas, periódicos, repositórios e banco de teses dos principais organismos públicos, bem como, artigos, anais e publicações de eventos, seminários e congressos relacionados aos temas: sensoriamento remoto e processamento digital de imagens para gestão ambiental.

Desta pesquisa inicial, vale destacar o vasto e qualificado acervo disponibilizado integralmente pelo INPE subsidiando à aplicação das técnicas e dos métodos realizados no processo de classificação temática do uso e ocupação do solo.

Dentre os demais documentos consultados estão: as estatísticas da produção agrícola (LSPA, Levantamento Sistemático da Produção Agrícola e SIDRA, Sistema IBGE De Recuperação Automática) disponibilizadas eletronicamente pelo IBGE; as informações agrícolas sistematizadas pelo Instituto Cepa/SC; o acervo bibliográfico referente ao ecossistema Mata Atlântica (SOS Mata Atlântica); o Atlas Climatológico, o Zoneamento Agroecológico e Sócio-Econômico, e Zoneamento Agrícola do Estado de Santa Catarina, ambos desenvolvidos pela Epagri.

Ainda como contribuição científica, evidencia-se as publicações de SACHET *et al.* (1994)<sup>37</sup> e MONEGAT (1994)<sup>38</sup> especificamente referidas à área de estudo.

Em nível *global* e em caráter *científico* as publicações mencionadas acima corroboram tanto para o aprofundamento teórico de metodologias e técnicas quanto para o levantamento de dados e informações relevantes relacionados ao mapeamento temático proposto neste trabalho.

### **Visitas técnicas realizadas**

No contexto explicitado no item 3.3.7. as **visitas técnicas** remetem ao nível de abordagem de análise *regional*, representando as *contribuições técnicas* relevantes ao tema de pesquisa proposto e/ou a área de estudo em questão.

Foram realizadas **visitas técnicas** aos principais organismos governamentais e atuantes na área de estudo com o objetivo de conhecer e obter dados e informações de interesse ao estudo proposto. Estas visitas foram realizadas previamente à manipulação dos dados orbitais e dentre os organismos visitados estão:

A Empresa de Pesquisa e Extensão Agropecuária do Estado de Santa Catarina (Epagri), especificamente ao Centro Integrado de Informações e Recursos Ambientais (Ciram) e ao Centro Integrado de Meteorologia e Recursos Hídricos (Climerh), no município de Florianópolis: onde investigou-se a disponibilidade de informações orbitais da área de estudo,

---

<sup>37</sup> A publicação de Sachet *et al.* (1994) refere-se ao Projeto Microbacias/BIRD, contemplando o Inventário das Terras da Microbacia do Caeté, intitulado: “*Levantamento Edafoclimático da Microbacia do Rio Caeté*”. Neste documento constam informações das classes de aptidão de uso das terras além de recomendações de uso e manejo para a microbacia hidrográfica.

<sup>38</sup> No trabalho de Monegat (1994), intitulado “*Sustentabilidade do Sistema de Produção da Cebola, Sob Cultivo com a prática do Pousio/Queima, na Microbacia Hidrográfica do Rio Caeté*”, evidencia-se que a prática de pousio/queima é uma séria ameaça ao sistema de produção de cebola, enfatizando ainda o autor o desaparecimento de horizontes superficiais de solo devido à erosão.

os trabalhos já desenvolvidos nesta área (Levantamento das Áreas de Cultivo de Arroz), bem como informações referentes ao clima e aspectos hidrológicos;

A Universidade Regional de Blumenau (FURB), especificamente ao Instituto de Pesquisas Ambientais (IPA) que faz parte dos agentes institucionais de estudos e pesquisas na Bacia do Itajaí: onde buscou-se conhecer os levantamentos já existentes (Mapeamento da Vegetação relacionando a Interceptação de Chuvas), o nível de detalhamento existente, a escala utilizada (1:50.000 para trabalhos em sub-bacias e 1:250.000 no contexto da RH7) e os temas mapeados (classes de vegetação).

Escritório Local da Epagri de Alfredo Wagner, representando a Secretaria da Agricultura deste município e o Sindicato dos Trabalhadores Rurais de Alfredo Wagner: onde, através do diálogo (entrevistas semi-estruturadas) buscou-se a fundamentação de dados e informações que subsidiaram a caracterização das práticas agrícolas locais; do volume, área e evolução da produção agropecuária.

A Secretaria de Obras do Município de Alfredo Wagner: onde obteve-se informações referentes à infra-estrutura local, tendo destaque o *mapa de localização de referência das propriedades*, o qual foi agregado às informações da base cartográfica e utilizado nos levantamentos de campo do presente.

### **Levantamentos de campo**

Representando o nível **local** de abordagem e remetendo as **contribuições comunitárias** estão os levantamentos expeditos de campo. Há de se considerar que se faz necessário o reconhecimento em campo das feições de interesse, que permeiam as fases do processamento digital de imagens aplicado (pré-processamento, realce, classificação e avaliação).

Para efetuar este reconhecimento, as saídas para levantamentos de campo contaram com impressões da base cartográfica da área de estudo, consubstanciadas pela composição colorida elaborada, pelo sistema de navegação e registro de pontos amostrais via o GPS (“*Global Position System*”), por máquina fotográfica para o registro das amostras das classes temáticas, e, pela caderneta de campo para anotações das observações técnicas e práticas da realidade local.

Os trabalhos de campo específicos para o mapeamento temático iniciaram em 15/05/2003 e concluíram-se em 23/03/2004. De quatro saídas a campo, especificamente para o mapeamento temático, as duas primeiras tiveram objetivo de treinamento, num total de cinco dias. As duas outras, para avaliação, totalizaram outros cinco dias de intensos levantamentos e

diálogos com a comunidade, visando dirimir dúvidas no reconhecimento da interpretação e validação temática.

Cabe salientar que as saídas a campo tornaram-se viáveis em virtude da participação de mediadores e facilitadores locais, estratégia incorporada ao Projeto Trilha nos trabalhos de SEIBT (2002), ALMEIDA (2003), SCHMITZ (2003) e MASSON (2004).

Outro aspecto relevante aos levantamentos de campo remete a realização do Cadastro EICOs<sup>39</sup> (**E**scolas, **I**grejas, **C**emitérios e **O**utros), realizado por este autor no âmbito do projeto *Controle de Enchentes e Gestão Ambiental Participativa* (Pompêo, 2004). Este cadastro de pontos de referência precedeu a presente pesquisa, servindo para o reconhecimento do município e da área de estudo, possibilitando ao autor identificar, conhecer e aproximar-se das características locais.

Os levantamentos de pontos amostrais e os registros fotográficos realizados em campo permitiram o estabelecimento de correlações entre as classes temáticas de uso e cobertura do solo. O fato de registrar as observações pontuais sob forma de fotografias aliado à informação da localização geográfica (coordenadas), possibilitou a incorporação de dados ao sistema de informação, resultando num banco de dados contendo cada um dos tipos de uso e ocupação do solo da área de estudo. Sendo assim, além da obtenção de informações (registro e áreas de treinamento) as saídas a campo embasaram a validação do mapeamento temático (acurácia do mapeamento).

Pode-se considerar que este processo de levantamento de dados e informações exigiu um enfoque transdisciplinar, uma vez que nas saídas de campo houve diálogo entre o pesquisador e a comunidade local (agricultores, madeireiros, entre outros), estabelecendo-se assim uma relação participativa entre os atores envolvidos, onde entrelaçaram-se os conhecimentos científicos e os saberes populares.

---

<sup>39</sup> Foram catalogados no município de Alfredo Wagner, entre 2001 e 2002, 116 pontos de referência, sendo 47 escolas, 28 igrejas, 22 cemitérios e 19 outros equipamentos públicos relevantes das comunidades.

## CAPÍTULO 4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados da presente pesquisa são apresentados sequencialmente conforme foram sendo obtidos e de acordo com a Tabela 9. Para isto, nos dois sub-itens que seguem apresenta-se inicialmente o levantamento dos índices físicos da área de estudo e em seguida os principais aspectos referentes ao processamento digital de imagens realizado. Este último remete aos resultados das operações efetuadas em meio digital que permitiram gerar as diferentes classificações, contemplando os resultados do pré-processamento da imagem, seguido das transformações de realce realizadas sobre as bandas originais que habilitaram as classificações temáticas e respectiva avaliação da qualidade dos produtos gerados.

### 4.1. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA

#### 4.1.2. CARACTERIZAÇÃO DOS ÍNDICES FÍSICOS

COMITÊ ITAJAÍ (2004) subdivide a RH7 em 7 sub-bacias (Figura 20), com as seguintes áreas referentes à base cartográfica 1:500.000: Sub-bacia Itajaí do Norte (3.315 km<sup>2</sup>), Sub-bacia Benedito (1.398 km<sup>2</sup>), Sub-bacia Luiz Alves (583 km<sup>2</sup>), Sub-bacia Itajaí-Açu (2.794 km<sup>2</sup>), Sub-bacia Itajaí-Mirim (1.673 km<sup>2</sup>), Sub-bacia Itajaí do Sul (2.309 km<sup>2</sup>) e Sub-bacia Itajaí do Oeste (2.928 km<sup>2</sup>).

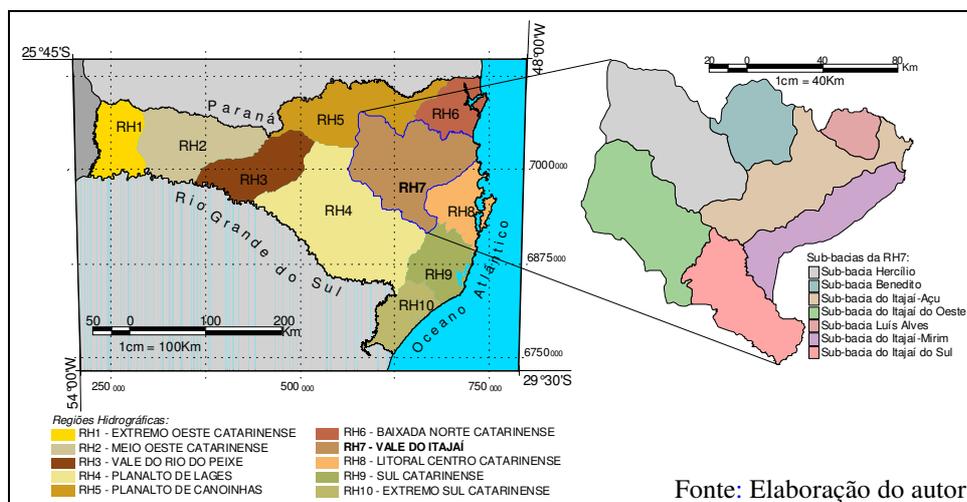
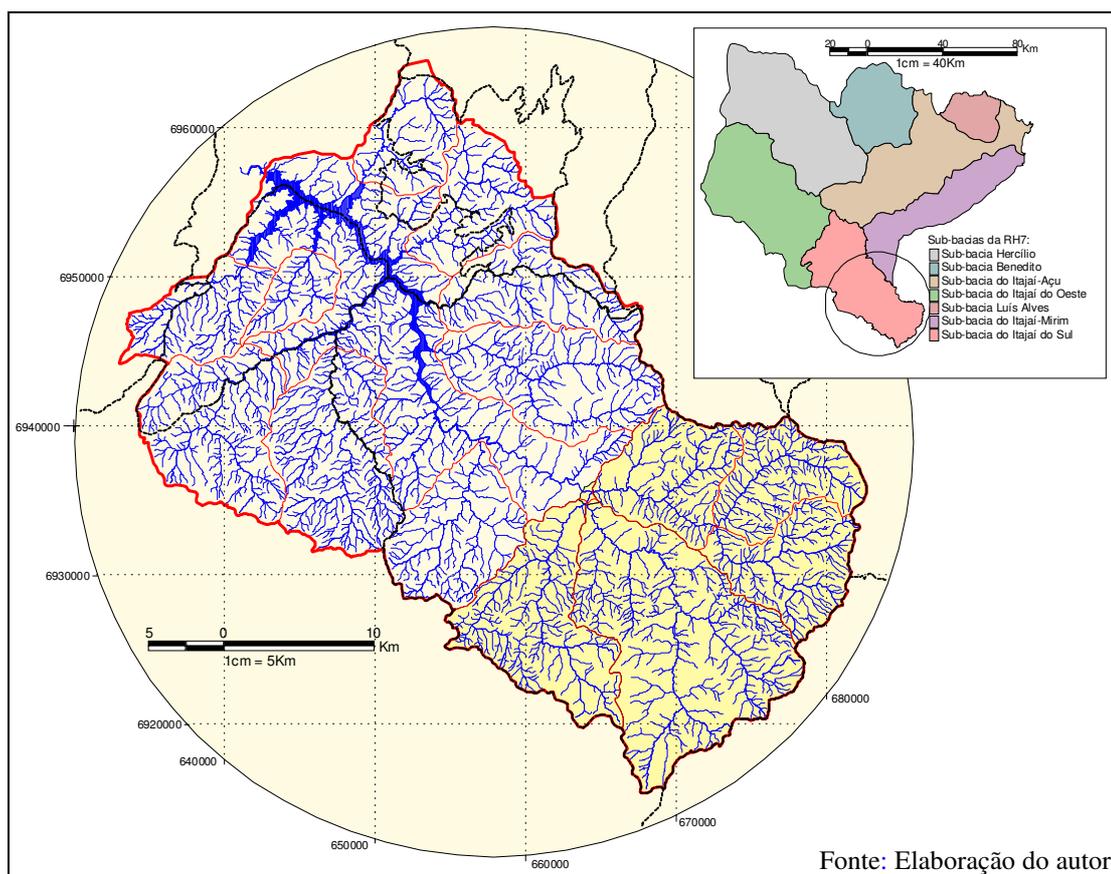
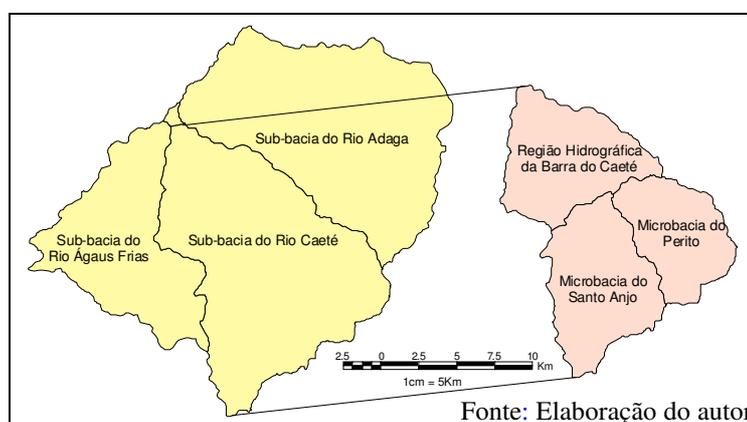


Figura 20 – Sub-bacias da RH7.

Apresenta-se aqui a caracterização física da bacia hidrográfica do rio Caeté, limitada aos seus índices físicos. Uma vez que este tipo de informação é útil para caracterizar uma bacia hidrográfica frente à outras bacias, é relevante relacionar os índices físicos das bacias do rio Águas Frias e Adaga, contíguas à do rio Caeté e também formadoras do rio Itajaí do Sul. Para complementar, incluem-se os índices em dois níveis superiores (Figura 21), ao longo do rio Itajaí do Sul – na seção onde origina-se esta denominação do rio e na seção da Barragem Sul, em Ituporanga – e também em dois níveis inferiores (Figura 22), correspondentes às microbacias dos formadores do Caeté, Perito e Santo Anjo.



**Figura 21 – Área de Drenagem da Represa de Ituporanga.**



**Figura 22 – Sub-bacias formadoras do Itajaí do Sul e Microbacias do Caeté.**

Esta caracterização, através dos índices físicos, é oportuna porque resulta diretamente de procedimentos realizados através da espacialização da base cartográfica em meio digital, realizada no presente trabalho. Justifica-se sua apresentação em virtude de outros esforços de pesquisa nesta região, definida como área de estudo piloto para o Projeto Trilha, constituindo-se em informações para consultas futuras.

Incluem-se aqui os seguintes índices físicos, definidos de acordo com Panichi *et al.* (1994), Área de drenagem, Perímetro, Comprimento total dos cursos d'água, Comprimento do talvegue principal, Comprimento axial do talvegue principal, Altitudes (máxima, mínima, média, mediana), Declividade da bacia (média e mediana), Coeficiente de compacidade, Densidade de drenagem, Índice de sinuosidade e Tempo de concentração

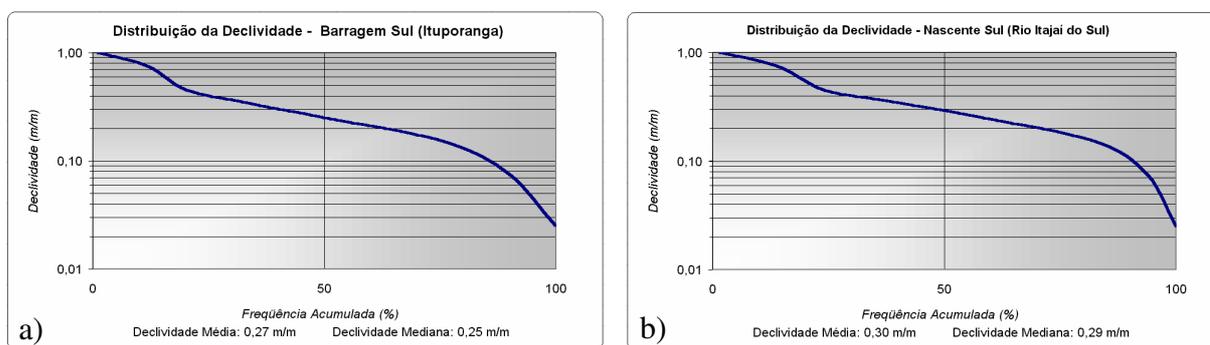
As comparações pertinentes são realizadas após a apresentação da Tabela 11, com valores obtidos a partir da base cartográfica digital, com referência de escala 1:50.000. As Figura 21 e Figura 22 ilustram os divisores hidrológicos, indicando as respectivas áreas de drenagem correspondentes aos níveis anteriormente mencionados.

**Tabela 11 – Síntese dos Índices Físicos (referência 1:50.000).**

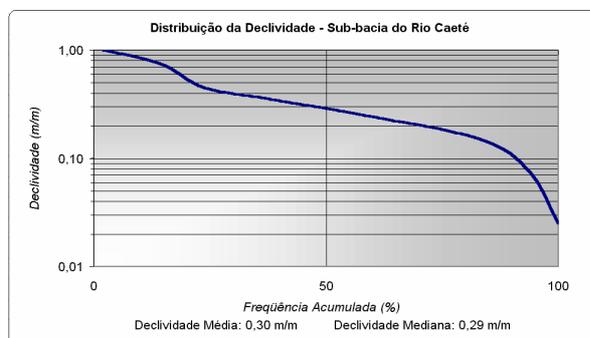
		NÍVEL 1						
		NÍVEL 2					NÍVEL 3	
		Barragem Sul (Tuporanga)	Nascente Sul (Rio Itajaí do Sul)	NÍVEL 3			NÍVEL 4	
				Sub-bacia do Rio Adaga	Sub-bacia do Rio Águas Frias	Sub-bacia do Rio Caeté	Microbacia do Rio Santo Anjo	Microbacia do Rio Perito
A	Km <sup>2</sup>	1170,04	414,83	163,29	86,83	163,61	61,06	43,50
P	Km	184,37	97,00	59,30	52,90	62,26	36,31	28,42
Lt	Km	2537,04	906,15	399,11	186,02	319,24	91,61	104,67
L	Km	67,09	27,38	22,99	20,32	27,38	14,38	11,42
La	Km	48,28	20,42	17,97	14,76	19,45	12,18	8,55
A <sub>máx</sub>	m	1762,00	1762,0	1219,0	1682,0	1762,0	1762,0	1221,0
A <sub>min</sub>	m	400,00	479,0	479,0	481,0	481,0	576,0	576,0
A <sub>média</sub>	m	765,50	904,8	874,8	972,0	901,6	1003,3	905,9
A <sub>med</sub>	m	754,70	906,4	901,1	941,6	902,2	973,2	936,5
D <sub>média</sub>	m/m	0,27	0,30	0,28	0,35	0,30	0,34	0,24
D <sub>med</sub>	m/m	0,25	0,29	0,27	0,32	0,29	0,31	0,23
Kc	[-]	0,022	0,033	0,051	0,085	0,053	0,083	0,091
Dd	Km/Km <sup>2</sup>	2,168	2,184	2,444	2,142	1,951	1,500	2,406
l	Km	0,115	0,114	0,102	0,117	0,128	0,167	0,104
Is	[-]	28,03	25,43	21,86	27,39	28,94	15,27	25,10
Tc	Horas	<b>16,69</b>	<b>5,11</b>	<b>2,28</b>	<b>1,04</b>	<b>2,19</b>	<b>0,84</b>	<b>0,79</b>
Tc	HHMM	<b>16h 41'</b>	<b>5h 07'</b>	<b>2h 17'</b>	<b>1h 02'</b>	<b>2h 11'</b>	<b>50'</b>	<b>47'</b>

Sendo: A (Área de Drenagem), P (Perímetro da Bacia), Lt (Drenagem Total), L (Drenagem Principal), La (Comprimento Axial),  $A_{máx}$  (Altitude Máxima),  $A_{min}$  (Altitude Mínima),  $A_{média}$  (Altitude Média),  $A_{med}$  (Altitude Mediana),  $D_{média}$  (Declividade Média),  $D_{med}$  (Declividade Mediana), Kc (Coeficiente de Compacidade), Dd (Densidade de Drenagem), l (Extensão Média do Escoamento Superficial), Is (Índice de Sinuosidade do Curso d'água) e Tc (Tempo de Concentração).

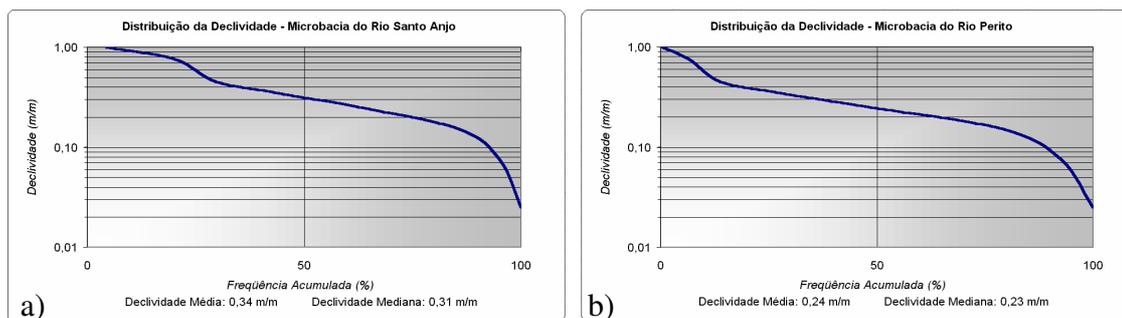
O primeiro aspecto que merece atenção é representado pelos elevados valores de declividade média das bacias hidrográficas formadoras do Itajaí do Sul, que corroboram a propensão à reduzidos tempos de concentração e grande potencial erosivo. Observa-se que a declividade média da sub-bacia do Caeté possui valor intermediário em relação às outras duas, por outro lado, há uma grande diferença entre os valores correspondentes às microbacias formadoras. Dentre estas, a microbacia do Santo Anjo é a de maior fragilidade, diretamente relacionada à declividade (Figura 23, Figura 24 e Figura 25). A Figura 26 ilustra as curvas hipsométricas correspondentes a maior área de drenagem (nível 1, Barragem Sul em Ituporanga) e a menor (nível 4, microbacia do Perito).



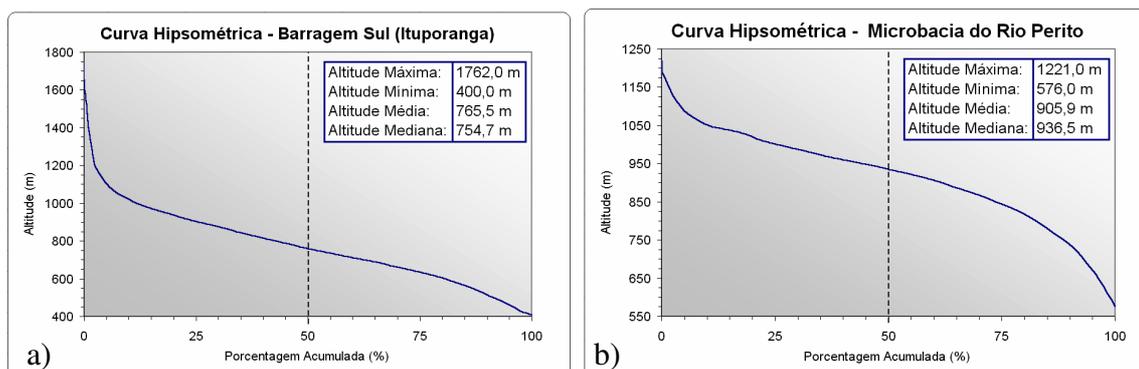
**Figura 23 – Distribuição da Declividade, a) Barragem Sul (Ituporanga) b) Nascente Sul (Rio Itajaí do Sul).**



**Figura 24 – Distribuição da Declividade, sub-bacia do Caeté.**

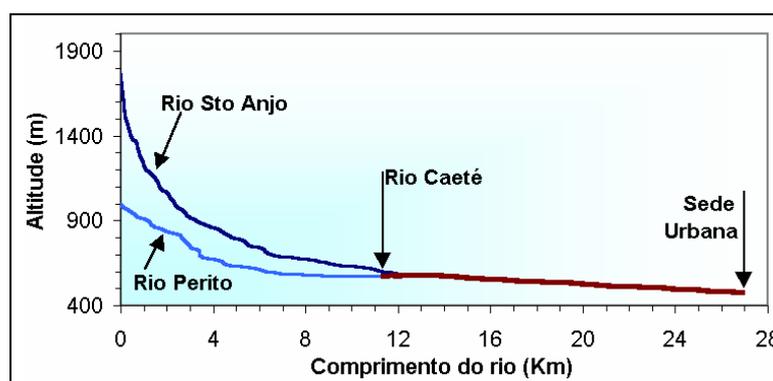


**Figura 25 – Distribuição da Declividade: Microbacia do a) Santo Anjo b) Perito.**



**Figura 26 – Curva Hipsométrica, a) Barragem Sul b) Microbacia do Perito.**

O coeficiente de compacidade indica a proximidade da forma da bacia hidrográfica ao círculo. Quanto mais próximo da unidade, maior é a proximidade à esta forma geométrica e, conseqüentemente, maior a probabilidade de enchentes. No presente caso, as microbacias formadoras do Caeté são muito propensas a enchentes, todavia, quando se toma esta sub-bacia integralmente, este valor é reduzido. A Figura 27, que mostra o perfil longitudinal do rio Caeté, incluindo os perfis de seus formadores, traz maior evidência desta afirmativa, com outra categoria de informação.



Fonte: VIECILI & POMPEO (2003).

**Figura 27 – Perfil Longitudinal do Rio Caeté e formadores.**

A densidade de drenagem e a extensão média do escoamento superficial, que para a microbacia do Perito apresentam os mais elevados valores, confirmam a estimativa comparativa do tempo de concentração mais reduzido para esta área, reafirmando sua propensão a enchentes de rápida ascensão.

## 4.2. PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGEM

As etapas contempladas no item 2.2. sintetizam o desenvolvimento deste trabalho, em busca da investigação quanto a validade das técnicas computacionais empregadas no mapeamento temático do uso e cobertura do solo.

Neste sentido, com o suporte teórico da revisão bibliográfica e metodologicamente descritos no Capítulo 3, apresenta-se os principais resultados e conclusões desta pesquisa quanto ao processamento digital de imagem no mapeamento temático proposto.

Antecede, no entanto, uma análise detalhada das características estatísticas das bandas espectrais do sensor ETM<sup>+</sup> do Landsat-7, órbita 220, ponto 079, quadrante C, contemplando a área de estudo, sub-bacia hidrográfica do rio Caeté, Município de Alfredo Wagner, registrada em 10/03/2002 e processada digitalmente nesta dissertação com vistas aos objetivos supracitados.

A investigação de valores e parâmetros estatísticos obtidos das bandas espectrais da imagem antes de qualquer operação (processamento) fornece numericamente aspectos fundamentais que muitas vezes determinam e/ou justificam as técnicas a serem empregadas nas correções e atenuações dos dados orbitais. Além disto, a compreensão da distribuição inicial dos dados radiométricos, fornece, por exemplo, indicadores quanto à seleção de bandas e o nível de repetição de informações para a elaboração de composições coloridas (imagens sintéticas).

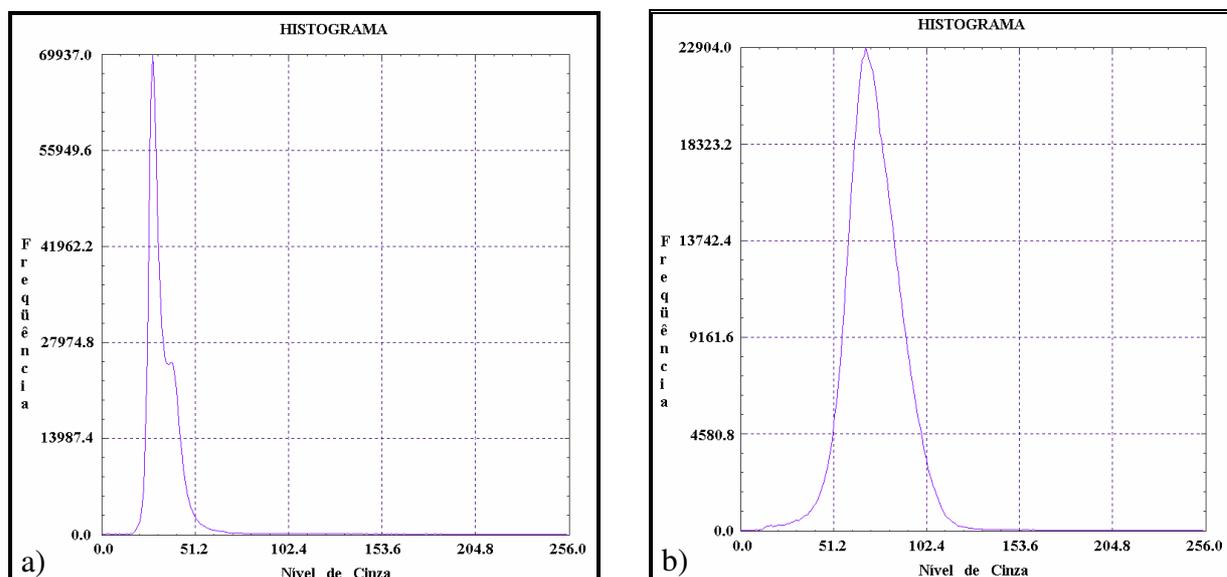
Em virtude do acima exposto, são abordados a seguir, os aspectos estatísticos referentes a análise inicial da distribuição da informação radiométrica das bandas espectrais. Nesta análise estão incluídas informações de todas as bandas com resolução espacial nominal de 30 metros (3, 4 e 5), mas obtidas com 25 metros por reamostragem. Também estão descritas informações com referência a banda 8, pancromática, com resolução espacial de 15 metros, obtida com reamostragem para 12,5 metros.

Concluída a exposição desta análise numérica das informações estatísticas são apresentados e discutidos os resultados quanto ao processamento digital de imagens.

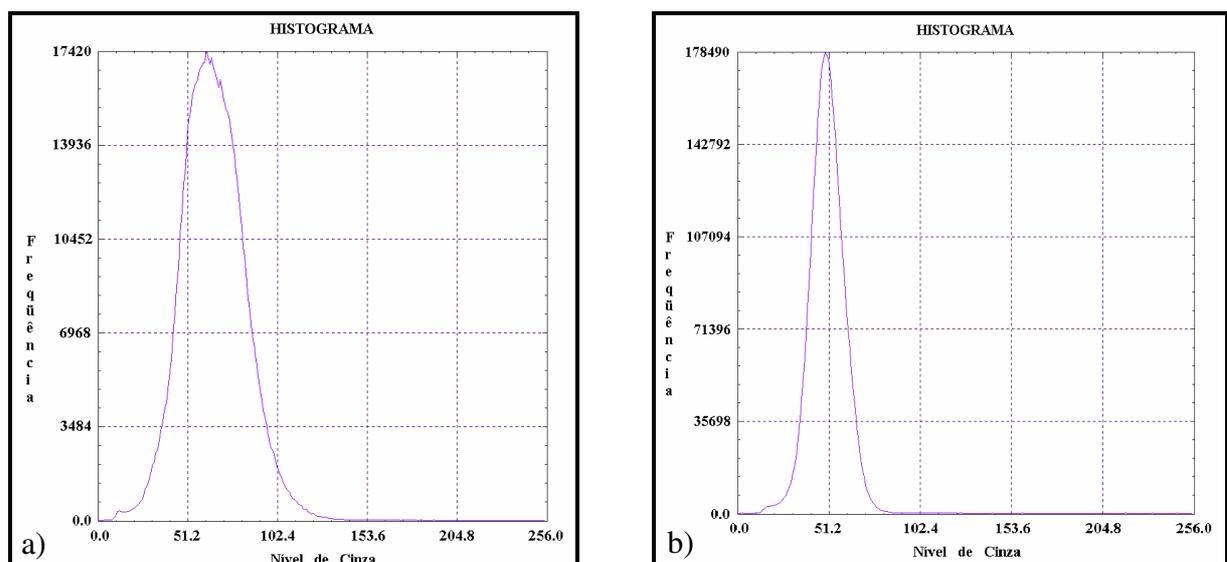
### Aspectos Estatísticos

O **histograma** representa a distribuição dos níveis de cinza de uma imagem, entretanto não fornece nenhuma referência espacial da localização destes dados. Fornece apenas a informação de quantos *pixels* na imagem possuem um determinado nível de cinza, definido entre 0 (preto) e 255 (branco), para uma imagem quantificada em 8 *bits*. Nas Figura 28 e Figura

29 apresenta-se, sob a forma de gráfico, a distribuição estatística dos níveis de cinza em termos de frequência em que ocorrem o número de "pixels" da imagem original.



**Figura 28 – Distribuição dos níveis de cinza. a) Banda 3 e b) Banda 4.**

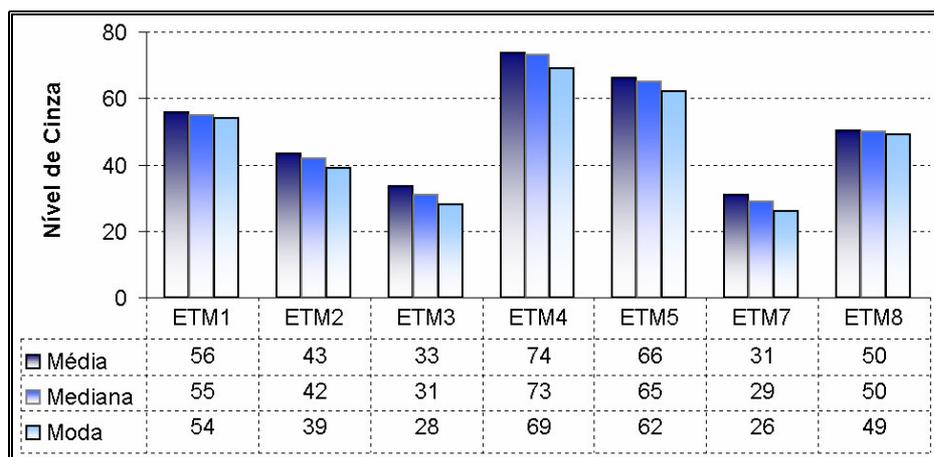
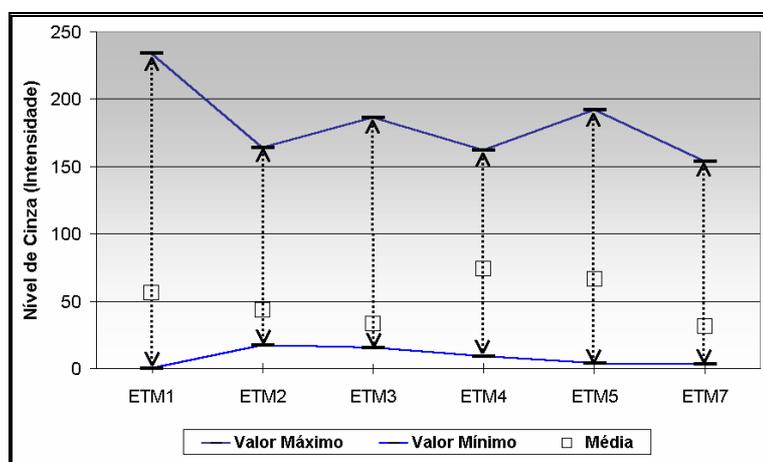


**Figura 29 – Distribuição dos níveis de cinza. a) Banda 5 e b) Banda 8.**

A distribuição dos níveis de cinza de cada banda espectral é a primeira informação derivada da análise do histograma. A partir da distribuição dos níveis de cinza pode-se obter também valores estatísticos que caracterizam as respostas espectrais das diferentes bandas. Na Tabela 12 descreve-se a amplitude dos níveis de cinza (valor mínimo e máximo), média, mediana, moda, variância e desvio padrão para as bandas do ETM<sup>+</sup> processadas para esta pesquisa. A Figura 30 ilustra de forma gráfica a variação dos valores da média, mediana e moda dos níveis de cinza. Já a Figura 31 informa a variação e média dos níveis de cinza.

**Tabela 12 – Síntese das informações estatísticas.**

Banda	Valor Máximo	Valor Mínimo	Média	Mediana	Moda	Variância	Desvio Padrão
ETM1	234	0	56	55	54	15	4
ETM2	164	17	43	42	39	37	6
ETM3	186	15	33	31	28	61	8
ETM4	162	9	74	73	69	221	15
ETM5	192	4	66	65	62	309	18
ETM7	154	3	31	29	26	89	9
ETM8	247	0	50	50	49	88	9

**Figura 30 – Valores de Média, Mediana e Moda para as bandas do ETM<sup>+</sup>.****Figura 31 – Valor Máximo, Mínimo e Média para as bandas do ETM<sup>+</sup>.**

Abordando em conjunto as informações dos níveis de cinza das bandas, pode-se correlacionar tais informações sob a forma de matrizes. Estas estão apresentadas conforme a Tabela 13 que descreve numericamente a correlação, ou seja, o nível de repetição das informações radiométricas entre as bandas 1 a 5 e 7 (todas com a mesma resolução espacial). Nesta tabela é destacado o valor indicativo da baixa correlação entre as bandas 3 e 4. Já a Tabela 14 apresenta a matriz de Co-Variância para as mesmas bandas, destacando o valor da banda 5 (infravermelho médio).

**Tabela 13 – Matriz de Correlação das bandas 1 a 5 e 7 do Landsat-7 ETM<sup>+</sup>.**

Banda	ETM1	ETM2	ETM3	ETM4	ETM5	ETM7
ETM1	<b>1,00</b>	0,89	0,88	0,32	0,75	0,82
ETM2	0,89	<b>1,00</b>	0,92	0,48	0,88	0,90
ETM3	0,88	0,92	<b>1,00</b>	<b>0,23</b>	0,80	0,90
ETM4	0,32	0,48	<b>0,23</b>	<b>1,00</b>	0,65	0,42
ETM5	0,75	0,88	0,80	0,65	<b>1,00</b>	0,94
ETM7	0,82	0,90	0,90	0,42	0,94	<b>1,00</b>

**Tabela 14 – Matriz de Co-Variância das bandas 1 a 5 e 7 do Landsat-7 ETM<sup>+</sup>.**

Banda	ETM1	ETM2	ETM3	ETM4	ETM5	ETM7
ETM1	<b>14,97</b>	21,02	26,66	18,17	50,96	30,06
ETM2	21,02	<b>37,28</b>	43,76	43,42	94,13	51,70
ETM3	26,66	43,76	<b>60,95</b>	27,24	109,53	66,34
ETM4	18,17	43,42	27,24	<b>220,73</b>	169,42	59,61
ETM5	50,96	94,13	109,53	169,42	<b>308,74</b>	155,77
ETM7	30,06	51,70	66,34	59,61	155,77	<b>89,48</b>

#### 4.2.1. PRÉ-PROCESSAMENTO

A fase de Pré-Processamento empregou técnicas de processamento digital de imagens, com objetivo de corrigir geometricamente e radiometricamente os dados remotamente captados, visando preparar o produto orbital (bandas espectrais) para futura classificação.

##### 4.2.1.1. Correção Geométrica

Conforme descrito no item 3.3.3., o produto orbital empregado no processamento digital de imagens para classificação temática foi obtido com nível de correção 1G, qualificando estes dados como fonte de informação cartográfica, pois apresentam um certo nível de correção, um sistema de projeção cartográfica (UTM – *Universal Transverse of Mercator*), bem como o datum planimétrico (SAD69 – *South American Datum, 1969*) como referência geodésica, conferindo assim um posicionamento relativo dos objetos da cena a um sistema de referência.

Na escolha do modelo polinomial (1<sup>o</sup>, 2<sup>o</sup> e 3<sup>o</sup>) para o **registro** da imagem, foi necessário definir pontos de controle para “refinar” a geometria da imagem original através de uma operação de transformação geométrica, além de escolher um interpolador das intensidades dos *pixels* com a finalidade de **reamostrar** por interpolação tais níveis de cinza para a imagem corrigida.

#### 4.2.1.1.1. Registro de Imagens

A operação de registro de imagem por pontos de controle não requer o conhecimento de parâmetros orbitais, e segundo Vergara *et al.* (2001) é necessário apenas contar com pontos de controle precisos, em quantidade suficiente e adequadamente distribuídos na área de estudo. Assim, na obtenção dos pontos de controle foram levados em conta a localização e distribuição dos pontos na área de estudo, bem como o número suportado pelo *software* utilizado (trinta e dois, no caso do *Spring*).

Para a coleta dos pontos de controle foi necessária uma análise detalhada da imagem, visando reconhecer interseções mais evidentes, além da infra-estrutura viária para checagem *in loco*. Quanto a localização, privilegiou-se os pontos perceptíveis na imagem e notáveis na base cartográfica. Quanto a distribuição, considerou-se a extensão da área de estudo e a possibilidade de acesso ao local, em virtude da necessidade do registro das coordenadas mediante o emprego do equipamento GPS.

No processo de registro da imagem foram identificados e registrados 32 pontos de referência dentro da área de estudo (163,59 km<sup>2</sup>), designando aproximadamente a média de 1 ponto de controle para cada 5 km<sup>2</sup>. Destes 32 pontos, 22 foram utilizados como “pontos de controle” e 10 foram utilizados com “pontos testes”, segundo nomenclatura do aplicativo<sup>40</sup>.

A partir dos pontos de controle foi calculada então a função polinomial que ajusta a imagem à base cartográfica. No presente trabalho, conforme descrito no item 3.2.1.1.1., foram testados os modelos polinomiais de 1º, 2º e 3º implementados no *Spring*, através da operação de registro do tipo “*mapa-imagem*”. A Figura 32, ilustra na escala 1:1.000.000 o resultado das transformações polinomiais testadas, onde pode-se perceber a forma final do recorte da cena. Na parte “a” desta figura tem-se translação e rotação, na “b” adiciona-se ainda parâmetros de torção e convexidade e na “c” demonstra-se a complexidade do resultado, não podendo ser explicada por efeitos físicos.

Uma vez aplicada a transformação polinomial para transpor a imagem para o sistema de coordenadas da base cartográfica, erros são gerados e propagados para as etapas subsequentes. Assim, a necessidade de avaliação destes erros é recomendada, podendo ser mensurada através do Erro Médio Quadrático<sup>41</sup> (EMQ) descrito na Equação 01.

---

<sup>40</sup> Os “pontos de controle” são utilizados no cálculo da função para a transformação geométrica, enquanto os “pontos testes” servem apenas para o cálculo da estimativa da precisão alcançada no registro, através de seus valores de erros.

<sup>41</sup> EMQ é conhecido na literatura pela abreviação RMSE do inglês *Root Mean Square Error*.

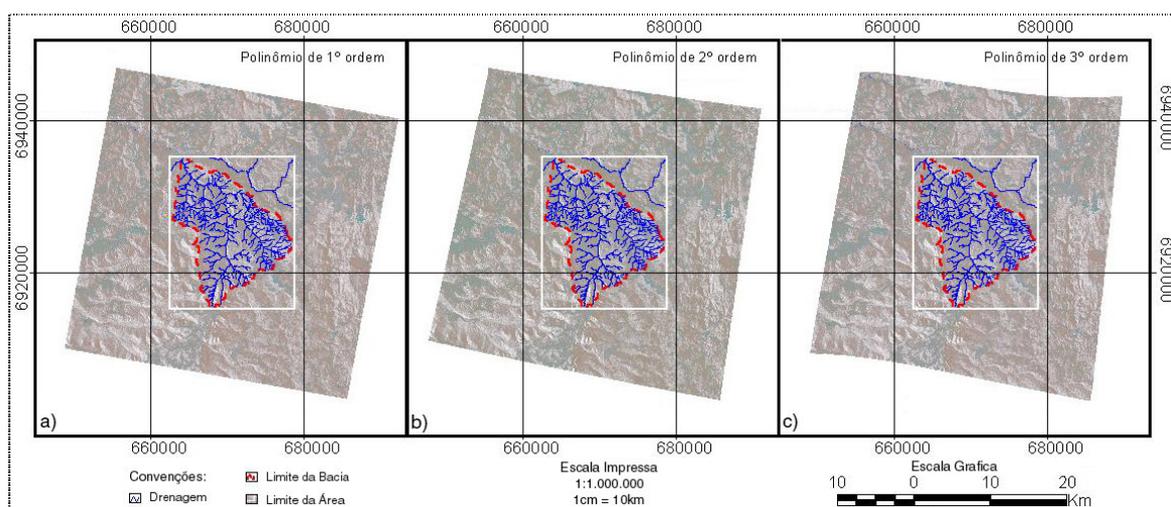


Figura 32 – Transformação polinomial de: a) 1ª ordem b) 2ª ordem c) 3ª ordem.

Tabela 15 – Estimativa do EMQ resultante do registro da imagem.

rótulo	Coordenadas Planas		Erro (pixel)		EMQ (pt e pc)	EMQ (pc)
	UTM (X)	UTM (Y)	x	y		
pt1	664449,4	6934024,9	1,35	0,84	1,59	-
pc2	<b>664085,7</b>	<b>6934840,2</b>	<b>0,51</b>	<b>0,32</b>	<b>0,60</b>	<b>0,60</b>
pt3	665740,4	6932268,3	-1,63	0,98	1,90	-
pc4	<b>668530,1</b>	<b>6931660,2</b>	<b>0,28</b>	<b>-0,56</b>	<b>0,63</b>	<b>0,63</b>
pc5	<b>669490,2</b>	<b>6930387,6</b>	<b>0,34</b>	<b>-1,12</b>	<b>1,17</b>	<b>1,17</b>
pc6	<b>669859,7</b>	<b>6928420,3</b>	<b>1,18</b>	<b>0,44</b>	<b>1,26</b>	<b>1,26</b>
pc7	<b>670361,9</b>	<b>6927614,5</b>	<b>0,66</b>	<b>-0,34</b>	<b>0,74</b>	<b>0,74</b>
pt8	674699,6	6923370,5	-1,43	1,38	1,99	-
pc9	<b>670475,9</b>	<b>6921153,9</b>	<b>-0,21</b>	<b>0,67</b>	<b>0,70</b>	<b>0,70</b>
pc10	<b>666935,6</b>	<b>6931425,9</b>	<b>-0,37</b>	<b>-0,26</b>	<b>0,45</b>	<b>0,45</b>
pt11	664569,9	6931589,6	1,34	0,92	1,63	-
pc12	<b>669818,9</b>	<b>6923751,9</b>	<b>0,57</b>	<b>-0,62</b>	<b>0,84</b>	<b>0,84</b>
pt13	669446,6	6923592,5	-0,88	1,47	1,71	-
pc14	<b>664606,6</b>	<b>6929641,5</b>	<b>0,86</b>	<b>0,62</b>	<b>1,06</b>	<b>1,06</b>
pc15	<b>670194,0</b>	<b>6927665,1</b>	<b>-0,29</b>	<b>-0,18</b>	<b>0,34</b>	<b>0,34</b>
pc16	<b>670089,8</b>	<b>6925478,6</b>	<b>0,19</b>	<b>1,17</b>	<b>1,19</b>	<b>1,19</b>
pt17	668723,9	6922586,8	1,82	0,83	2,00	-
pc18	<b>667830,3</b>	<b>6924751,1</b>	<b>0,21</b>	<b>-1,17</b>	<b>1,19</b>	<b>1,19</b>
pc19	<b>666782,9</b>	<b>6927823,3</b>	<b>-0,43</b>	<b>1,18</b>	<b>1,26</b>	<b>1,26</b>
pt20	668434,4	6918395,8	-0,85	1,27	1,53	-
pc21	<b>674405,3</b>	<b>6921249,7</b>	<b>0,43</b>	<b>-0,22</b>	<b>0,48</b>	<b>0,48</b>
pc22	<b>672638,9</b>	<b>6925987,2</b>	<b>0,38</b>	<b>0,97</b>	<b>1,04</b>	<b>1,04</b>
pt23	665603,6	6934274,6	0,87	1,34	1,60	-
pc24	<b>672132,3</b>	<b>6927103,9</b>	<b>-1,07</b>	<b>0,35</b>	<b>1,13</b>	<b>1,13</b>
pt25	671516,3	6920228,5	-0,93	-1,29	1,59	-
pc26	<b>673739,5</b>	<b>6924772,6</b>	<b>0,62</b>	<b>-1,13</b>	<b>1,29</b>	<b>1,29</b>
pc27	<b>676345,8</b>	<b>6925573,3</b>	<b>1,18</b>	<b>0,12</b>	<b>1,19</b>	<b>1,19</b>
pc28	<b>675239,0</b>	<b>6927859,2</b>	<b>0,83</b>	<b>0,82</b>	<b>1,17</b>	<b>1,17</b>
pt29	669562,1	6929210,0	1,12	-1,17	1,62	-
pc30	<b>664437,1</b>	<b>6926571,7</b>	<b>-0,47</b>	<b>0,99</b>	<b>1,10</b>	<b>1,10</b>
pc31	<b>667890,7</b>	<b>6931844,6</b>	<b>1,13</b>	<b>0,37</b>	<b>1,19</b>	<b>1,19</b>
pc32	<b>665261,7</b>	<b>6932675,2</b>	<b>-0,58</b>	<b>0,21</b>	<b>0,62</b>	<b>0,62</b>
				<b>Total</b>	<b>1,18</b>	<b>0,94</b>

Nota: “pc” designa “ponto de controle” e “pt” designa “ponto teste”.

A Tabela 15 apresenta os resultados do registro da imagem em estudo. Nela estão descritos todos os pontos, com respectivos rótulos de identificação, coordenadas planas, bem como os erros quadráticos médios em valores de *pixel*.

Inicialmente todos os pontos identificados foram considerados no registro da imagem, gerando o valor 1,18 *pixels* na estimativa do EMQ, superando o valor unitário de um *pixel*. Visando melhorar a qualidade geométrica, os pontos foram categorizados em função do erro que cada ponto apresentava individualmente em relação aos demais, assim, todos os pontos com valores de EMQ superiores à 1,5 *pixel*, num total de dez, foram excluídos do cálculo (denominando-se “*pontos testes*”). Os outros 22 pontos foram então rotulados como “*pontos de controle*”, sendo que destes, 3 apresentaram erros inferiores à 0,5 *pixel*, 6 pontos com erros entre 0,5 e 1,0 *pixel* e 13 pontos com erro entre 1,0 e 1,5 *pixel*.

Ao término da análise, a medida do EMQ foi estimada com os 22 pontos de controle (última coluna da Tabela 15, destacada na cor vermelha), resultando no valor de **0,94 *pixels***, o que significa um EMQ de 23,5 *metros*, uma vez que os *pixels* estão reamostrados com resolução espacial de 25 *metros*. Desta maneira, considerou-se aceitável e significativa a correção geométrica realizada, tendo em vista o valor inferior a um *pixel*, como medida do desvio dos valores calculados em relação aos valores originais.

#### 4.2.1.1.2. Reamostragem

Para concluir a etapa de **Correção Geométrica**, após a fase do registro da imagem ao mapa empregando transformações geométricas, foi necessária a atribuição dos valores dos níveis de cinza de acordo com a nova referência.

Para isto, após alguns testes, o interpolador por *vizinho mais próximo* foi escolhido em relação ao interpolador *bilinear*, uma vez que o primeiro preserva os valores radiométricos originais das imagens atribuindo ao valor de nível de cinza do *pixel* da imagem corrigida o mesmo valor do nível de cinza do *pixel* que se encontra mais próximo da posição a ser ocupada. Nesta técnica de reamostragem não há alteração na intensidade (valor) de nível de cinza pois o interpolador por *vizinho mais próximo* tem os valores de cinza originais, com a sua localização adaptada à nova geometria da imagem corrigida. Esta é a principal vantagem deste interpolador, segundo a literatura, quando serão aplicados classificadores. Como desvantagem é que podem ter sido eliminadas as transições graduais de tons de cinza na imagem transformada, devido a repetição de alguns desses valores, conforme discutido no item 2.2.1.1.2.

A interpolação das intensidades dos *pixels*, com a finalidade de **reamostrar** por interpolação os níveis de cinza para a imagem corrigida, apresentou diferentes precisões em função do modelo de interpolação implementado em cada método. Além do tipo de interpolador selecionado, outros fatores que interviram nos resultados da operação de reamostragem foram os pontos de controle selecionados e a respectiva função de transformação geométrica para o registro (grau do polinômio).

#### **4.2.1.2. Correção Radiométrica**

Ainda com referência ao **Pré-Processamento Digital de Imagens**, após a conclusão da etapa de **Correção Geométrica**, resta a etapa de **Correção Radiométrica**. Esta pode ser subdividida em: a) Restauração da Imagem para Eliminação do Ruído, e b) Correção Atmosférica – apresentadas a seguir.

A necessidade de correção das distorções radiométricas está diretamente relacionada com a utilização da imagem. Para estudos multitemporais a correção da elevação solar e da distância Sol – Terra são requeridas, já para estudos de uma única cena, a correção deste tipo de distorção radiométrica perde a relevância. Considerando ainda que o produto orbital disponibilizado já apresentava “correção do sistema”, incluindo uma “calibração radiométrica” aplicada, optou-se pela utilização de consagradas técnicas cosméticas de Restauração da Imagem e Correção da Atmosfera envolvendo toda a cena e, assim, diminuindo o risco de degradação dos dados originais.

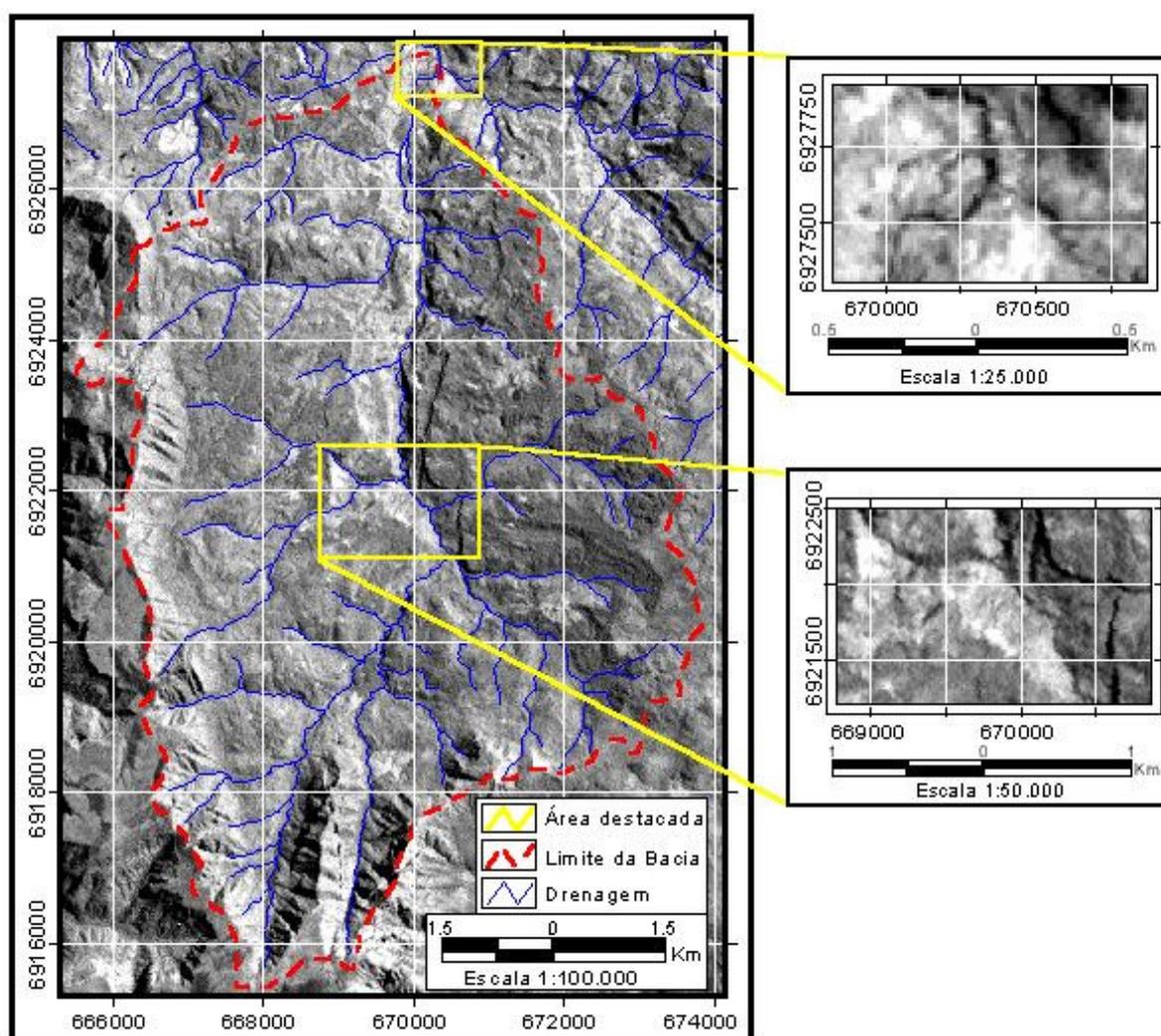
##### **4.2.1.2.1. Restauração da Imagem e Eliminação de Ruídos**

No presente estudo de caso não foram percebidos pontos de ruído – caracterizados pela presença de *pixels* com níveis de cinza bem diferentes da sua vizinhança – e de falhas devido o funcionamento dos sensores – linhas anômalas com características similares representando uma informação perdida. Em virtude disto, optou-se pelo emprego de apenas uma operação de filtragem do tipo linear, visando suavizar possíveis pontos isolados que apresentassem alguma discrepância nos valores de cinza em relação a vizinhança.

Deste modo, a operação de filtragem escolhida foi a aplicação de um filtro linear do tipo *passa-baixa* com máscaras de vizinhança de 3 x 3 *pixels*. Este tipo de filtro também é conhecido por filtro de média, pois obtêm a média entre pontos vizinhos. A adoção do filtro *passa-baixa* buscou desta maneira: minimizar efeitos de possíveis *pixels* ruidosos; restaurar a

imagem, suavizando sua textura; e, com isto, aprimorar as imagens para um melhor desempenho na fase de segmentação.

Os resultados da operação de filtragem linear podem ser observados nas Figura 33, Figura 34 e Figura 35, que ilustram o efeito visual da aplicação do filtro *passa-baixa* suavizando a imagem e reduzindo o número de níveis de cinza da cena. A Figura 33 representa o canal 8 (banda PAN) sem aplicação do filtro linear e a Figura 34 representa a mesma faixa espectral, agora com a filtragem do tipo *passa-baixa*. Já a Figura 35 agrupa duas áreas específicas com escalas de impressão diferentes, na parte “a” a imagem não está filtrada e na parte “b” o resultado do filtro *passa-baixa* onde as altas freqüências, correspondentes às transições abruptas, estão atenuadas, conferindo aspecto de borramento da imagem.



**Figura 33 – Banda 8 (pancromática) sem filtragem linear.**

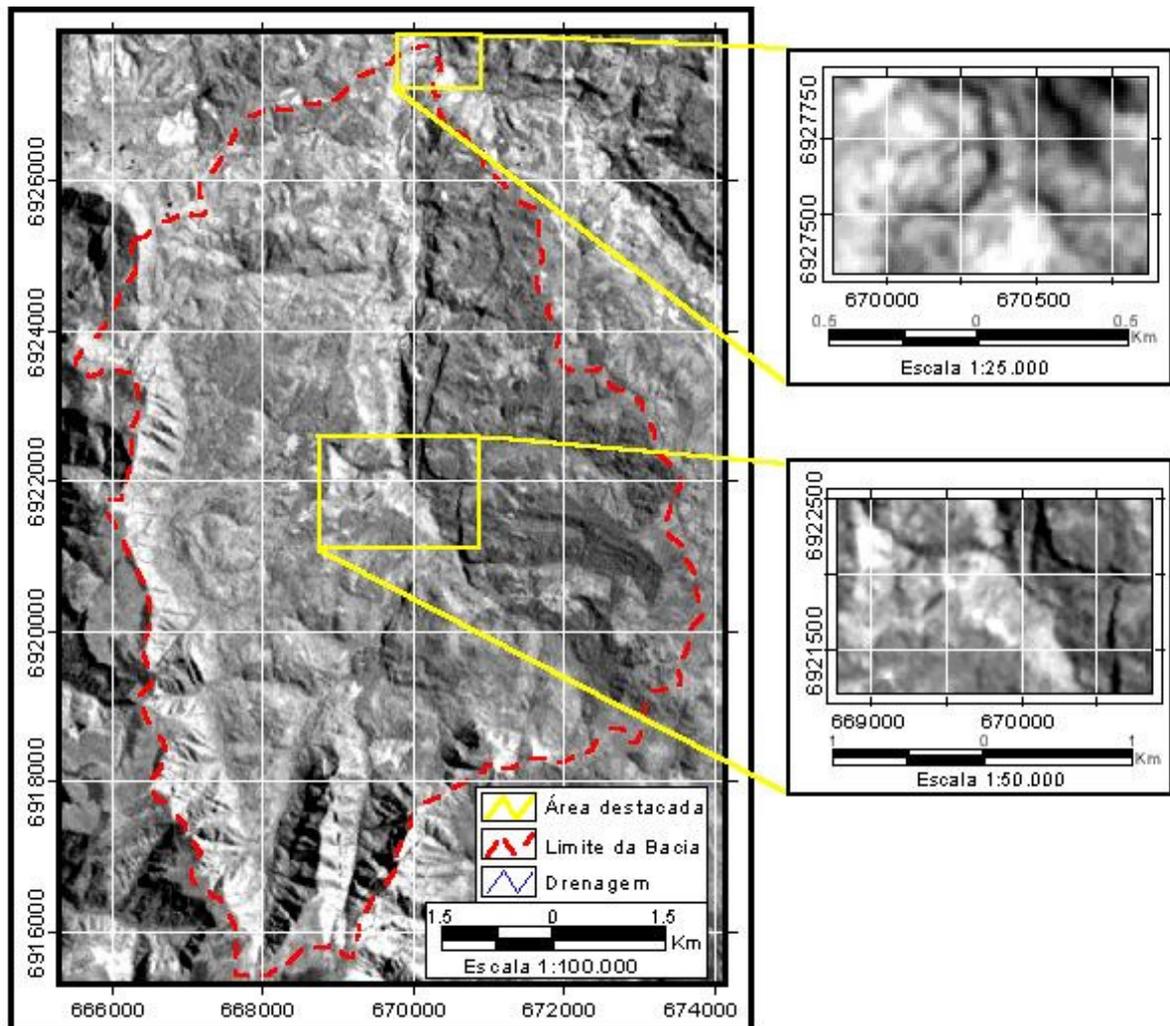


Figura 34 – Banda 8 (pancromática) com filtragem linear do tipo *passa-baixa* (3 x 3).

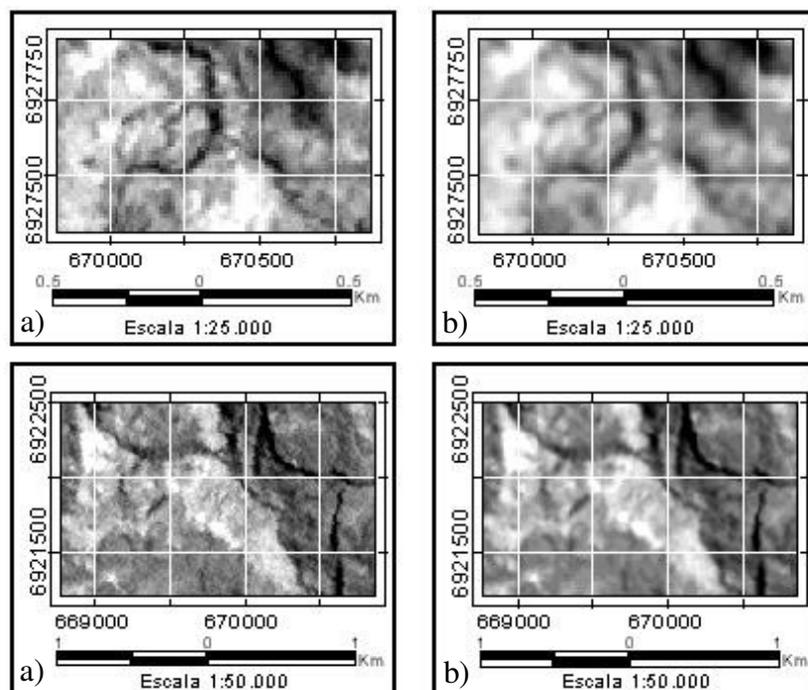


Figura 35 – Banda 8 (pancromática). a) sem filtro e b) com filtro *passa-baixa* (3x3).

#### 4.2.1.2.2. Correção Atmosférica

A correção atmosférica foi realizada empregando o método de subtração do *pixel* escuro, conhecido como correção do histograma pelos seus valores mínimos. Este método considera que a interferência da atmosfera é aditiva aos sinais provenientes dos alvos. Assumindo então que o menor valor de nível de cinza de cada banda representa o efeito aditivo da atmosfera.

O método de subtração do *pixel* escuro, também denominado correção do histograma pelos seus valores mínimos (*Histogram Minimum Method – HMM*), é um método relativamente simples para amenizar os efeitos atmosféricos. Considera-se que as áreas cobertas com materiais de forte absorvância, como água e zonas de sombra, deveriam apresentar uma radiância nula, e portanto, o que estas áreas estão registrando é atribuído à atmosfera. Da análise dos histogramas identificou-se o nível de cinza mínimo de cada banda espectral. Este valor foi utilizado na subtração para cada um dos *pixels* dessa banda.

Da estatística das imagens, representada pelo histograma com a distribuição de níveis de cinza da cena, pôde-se obter os valores mínimos para cada banda espectral, conforme apresentado na Tabela 12. Os valores dos níveis de cinza mínimos, encontrados para as bandas 3, 4 e 5, foram respectivamente 15, 9 e 4, sendo estes utilizados na determinação da grandeza do sinal atmosférico adicionado à imagem. Estes valores mínimos representam as regiões de baixa reflectância da cena e correspondem às áreas dos corpos d'água e/ou de sombreamento do relevo.

Com a aplicação do método de subtração do *pixel* escuro para correção (atenuação) da atmosfera, os valores mínimos registrados em cada banda foram atribuídos à atmosfera, sendo subtraídos para a respectiva banda. O valor utilizado na subtração de cada banda foi considerado o efeito aditivo da atmosfera daquela banda.

Definido os valores mínimos de nível de cinza de cada banda procedeu-se a correção dos efeitos da atmosfera para cada banda, através de linguagem específica de programação do Spring implementada via LEGAL. A rotina do “Programa em LEGAL” utilizado para Correção Atmosférica é descrita no Anexo I.

#### 4.2.2. REALCE

Concluída a etapa de **Pré-Processamento de Imagens**, envolvendo a correção geométrica e radiométrica, realizou-se o realçamento das imagens precedentemente às classificações.

As **técnicas de realce** foram utilizadas para enfatizar feições, destacando algumas características de interesse, visando melhorar a qualidade visual da imagem e com isto permitir uma melhor discriminação dos objetos presentes na cena para a extração de dados da imagem.

Em virtude do baixo contraste espectral das bandas, a aplicação de técnicas de realçamento foi imprescindível no presente estudo, pois contribuiu na adaptação das cores da imagem para o sistema visual humano.

Neste sentido, utilizaram-se as técnicas de realce de contraste, razão entre bandas (divisão entre canais), transformação IHS (Intensidade, Matiz, Saturação) além de composições coloridas.

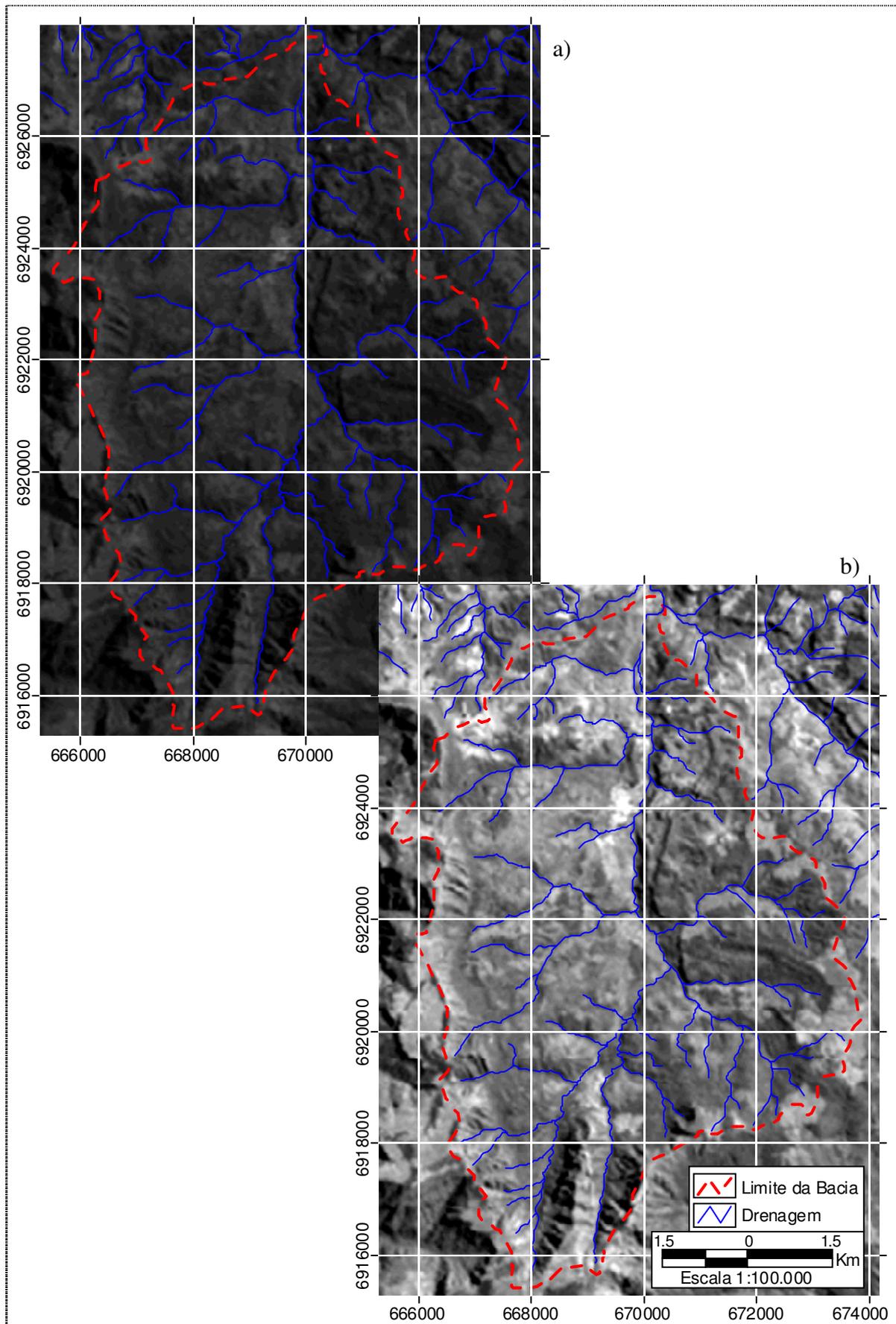
#### **4.2.2.1. Realce de Contraste**

Aplicou-se a função de transformação de contraste linear em cada banda visando melhorar a visualização. Com isso, o menor valor original de nível de cinza de cada banda é levado a zero, o maior valor original de cada banda é levado a 256; e os valores intermediários são distribuídos linearmente entre esses extremos. Conseqüentemente, o histograma de distribuição dos números digitais da imagem de saída é idêntico em formato ao histograma de entrada, exceto que ele possui um valor médio e um espalhamento diferentes. Em virtude disto, o histograma de saída apresenta o intervalo original de níveis de cinza expandindo em relação a imagem original.

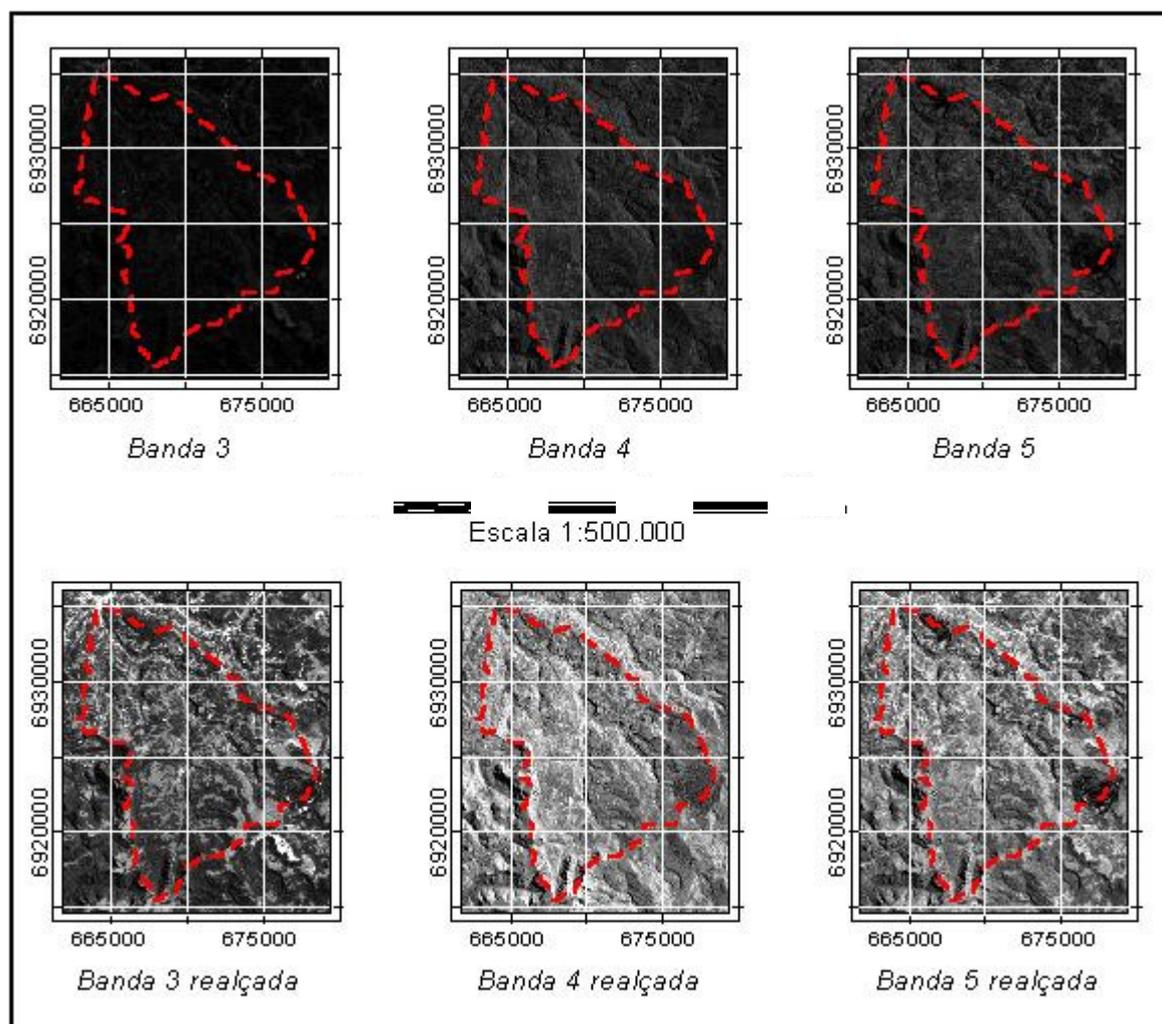
Como resultado do aumento linear de contraste em cada banda temos a maior amplitude possível, levando em consideração a resolução radiométrica do sensor ETM<sup>+</sup> equivalente a 256 níveis de cinza (8 bits), bem como dos níveis de visualização suportados pelo aplicativo Spring.

A Figura 36 ilustra o resultado da aplicação do aumento de contraste linear sobre a banda 5 (infravermelho médio) para a Microbacia do Rio Santo Anjo na escala 1:100.000, sendo que na parte “a” a banda 5 está corrigida geométrica e radiometricamente e, na parte “b”, além do pré-processamento, está aplicado o contraste linear, conferindo a esta banda um realçamento de alto contraste.

Já a Figura 37 apresenta as três bandas utilizadas na classificação temática da área de estudo na escala 1:500.000. Na parte superior desta figura ilustra-se as bandas 3, 4 e 5 pré-processadas e na parte inferior, com melhor qualidade visual, apresenta-se novamente estas três bandas, agora realçadas através da aplicação do aumento linear do contraste.



**Figura 36 – Microbacia do Santo Anjo: a) imagem com pré-processamento aplicado  
b) imagem com pré-processamento e realce linear de contraste.**



**Figura 37 – Sub-bacia do Caeté, bandas pré-processadas (superior) e bandas pré-processadas e realçadas (inferior).**

#### **4.2.2.2. Transformações Multiespectrais**

Ainda, buscando uma melhor discriminação dos objetos presentes na imagem, procedeu-se algumas *transformações multiespectrais*. Basicamente, foram testadas **operações aritméticas de divisão** (razão) entre bandas, visando o realce de diferenças espectrais para a atenuação do efeito da topografia; além da **transformação IHS**, com o objetivo de aumentar a resolução espacial das bandas 3, 4 e 5 através da fusão com a banda 8 (pancromática); e da elaboração de **composições coloridas** envolvendo canais espectrais (3, 4, 5).

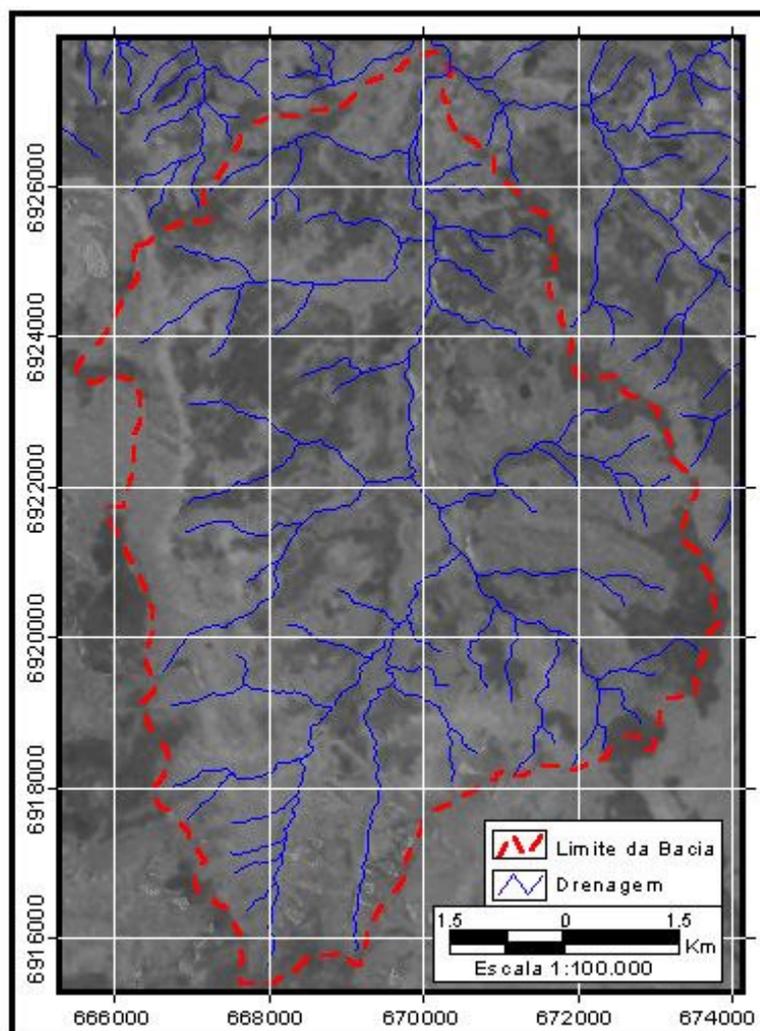
#### 4.2.2.2.1. Razão entre Bandas

Quanto às **operações aritméticas**, utilizou-se transformações pontuais (“*pixel a pixel*”) entre as imagens das bandas 3, 4 e 5 através de regras matemáticas implementadas no *software* com o objetivo de reduzir os efeitos de sombreamento do relevo na resposta espectral dos alvos, ou seja, diminuir as variações de radiâncias da imagem resultantes do efeito de topografia. Na correção (atenuação) dos efeitos da topografia e conseqüente sombreamento foi empregado o método de **razão entre bandas**, sendo testadas e aplicadas as operações de divisão (razão) entre as bandas 3, 4 e 5.

O método de **Razão entre Bandas** foi aplicado, via linguagem de programação LEGAL para todas as combinações possíveis entre as bandas 3, 4 e 5. As combinações foram denominadas RZ34, RZ43, RZ45, RZ54, RZ53 e RZ35 correspondendo respectivamente a divisão entre os canais 3 e 4, 4 e 3, 4 e 5, 5 e 4, 5 e 3, e 3 e 5. Assim, foram geradas 6 novas imagens como produtos da operação aritmética de divisão entre os canais espectrais.

Além das bandas, como informação de entrada foram utilizados dois valores modulares para aplicação da atenuação do efeito de sombreamento topográfico para as 6 possibilidades de combinação. Os valores modulares multiplicativo e aditivo são utilizados na compressão dos dados para uma única imagem e, correspondem respectivamente, ao fator de ganho, igual a 25 e de *offset* igual a 35, sendo estes adotados como constantes para todas as divisões de canais.

Para avaliar os 6 novos produtos gerados privilegiou-se as divisões entre bandas que produziram, **segundo análise visual**, as melhores atenuações do sombreamento do relevo. Das 6 combinações, as que melhor refletiram o objetivo da técnica foram as que envolveram a banda 4 (RZ43, RZ45 e R54), cuja rotina de cálculo programada em LEGAL está descrita no Anexo II. Destas 3 melhores imagens, geradas através da operação de divisão, a que evidencia com maior intensidade a redução do efeito da topografia é a imagem RZ45. Esta imagem atenuou o efeito de sombreamento do relevo principalmente nas regiões íngremes, localizadas na porção superior da microbacia, conforme ilustra a Figura 38, a qual pode ser compreendida melhor quando comparada à Figura 36.



**Figura 38 – Razão entre as bandas 4 e 5, com fator de ganho 25 e *offset* 50.**

#### 4.2.2.2.2. Composições de Bandas

A partir das imagens realçadas foram testadas combinações entre bandas de acordo com os três canais de cores do sistema RGB e com as características intrínsecas de cada faixa espectral. Buscou-se eleger uma composição colorida<sup>42</sup> com poder discriminatório visual entre as classes temáticas e que representasse apropriadamente as classes de uso e cobertura do solo presentes na área de estudo.

Das sete bandas disponibilizadas utilizaram-se para a composição colorida apenas os canais espectrais 3 (visível: vermelho, 0,63–0,69 $\mu$ m), 4 (infravermelho próximo, 0,78–0,90 $\mu$ m) e 5 (infravermelho médio, 1,55–1,75 $\mu$ m), com resolução espacial análoga. Estas 3 bandas foram selecionadas, conforme citadas no item 3.3.4., considerando basicamente dois

<sup>42</sup> A elaboração de **composições coloridas** envolvendo canais espectrais tem por objetivo sintetizar num único produto as informações radiométricas de três bandas de acordo com um sistema pré definido de cores.

aspectos: a) *características espectrais* de acordo com o objetivo e a finalidade de aplicação do estudo proposto e b) *análise estatística* de parâmetros relevantes à combinação de imagens.

Considerando as *características espectrais*, a **banda 3** (visível: vermelho) foi selecionada pois apresenta forte absorção pela vegetação verde e um bom contraste entre diferentes tipos de cobertura vegetal (p. ex.: campo e floresta). A **banda 4** (infravermelho próximo) contém informações sobre a vegetação que, quando verde, densa e uniforme, reflete intensamente a energia, além de ser útil na identificação de culturas uma vez que realça o contraste solo/cultura. Já a **banda 5** (infravermelho médio) foi selecionada pois apresenta sensibilidade ao teor de umidade das plantas, servindo para observar estresse na vegetação, causado por deficiência hídrica, além de permitir a diferenciação de áreas de nuvens.

De acordo com a *análise estatística*, alguns parâmetros fundamentam a seleção destas 3 bandas para composição colorida falsa cor. A saber, as bandas 3 e 4 foram selecionadas por serem as que apresentaram a menor correlação com as demais (Tabela 13) o que significa menor repetição dos dados entre estes canais espectrais e por conseguinte, maior capacidade de discriminação dos alvos da cena. Em termos estatísticos, a banda 5 foi utilizada pois apresentou os maiores valores de variância e co-variância (cujos valores estão respectivamente descritos na Tabela 12 e Tabela 14), indicando maior poder discriminatório em função da amplitude da variância dos níveis de cinza.

Selecionadas as bandas espectrais parte-se para a definição das cores, referentes ao sistema RGB, para a elaboração da composição colorida. Foram elaboradas ao todo 6 composições coloridas, gerando 6 *imagens sintéticas* com o mesmo conteúdo radiométrico. Tendo em vista que a resposta espectral da composição independe da seqüência de associação das cores, buscou-se privilegiar o resultado que traduziu em melhor “percepção visual” para o analista.

Das composições coloridas geradas adotou-se, segundo o critério de “percepção visual”, a composição colorida falsa cor 453 no sistema RGB (Anexo VI). Assim, a banda 4 (infravermelho próximo) foi associada ao canal vermelho, a banda 5 (infravermelho médio) ao canal verde e a banda 3 (visível, vermelho) foi associada ao canal azul. Tanto as bandas espectrais quanto a seqüência de cores RGB têm sido freqüentemente utilizada para classificação temática do uso e cobertura do solo conforme a literatura.

Assim, esta composição contempla as três bandas de maior interesse para o presente estudo, pois apresenta baixa correlação entre as bandas e a seqüência em que foram atribuídas as cores aos canais do sistema RGB, resultando num aspecto visual apropriado para o mapeamento temático proposto.

Uma vez definida a composição colorida falsa cor 4R-5G-3B, poder-se-ia realizar a obtenção das assinaturas espectrais para esta composição. Entretanto, optou-se pela extração destas informações somente após a restauração desta composição para a resolução da banda pancromática, visando melhorar a eficácia na definição das assinaturas espectrais para cada classe temática.

#### 4.2.2.2.3. Transformação IHS

A **transformação IHS** foi utilizada como técnica para fusão de bandas de diferentes resoluções. Esta técnica objetivou aumentar a resolução espacial das bandas espectrais 3, 4 e 5 (composição colorida), através da fusão com a banda espectral 8 (pancromática), com a finalidade de se obter mais informações a partir da transformação. Como resultado, as bandas 3, 4 e 5, que apresentavam resolução de 25 metros, foram restauradas para 12,5 metros (resolução espacial da banda pancromática).

A operação de transformação IHS permitiu, basicamente, a separação da informação espacial da espectral, utilizando a composição colorida das bandas 453 e a imagem da banda pancromática. Na transformação, a informação espectral foi separada na componente intensidade (informação espacial da banda 8) e a informação espacial foi separada nas componentes matiz e saturação (informação espectral da composição colorida). Isto permitiu manipular de maneira independente a informação espacial, mantendo o balanço de cores da composição colorida.

Nos canais do sistema RGB as bandas 3, 4 e 5 foram colocadas no azul, vermelho e verde, respectivamente, sendo realizada a transformação para o espaço IHS, ou seja, as imagens resultantes são relativas à intensidade, matiz e saturação das três imagens originais. No espaço IHS realizou-se a transformação (reversão) das imagens para o espaço RGB, substituindo a componente intensidade pela imagem pancromática (banda 8). A Figura 39 sintetiza a conversão RGB-IHS e IHS-RGB com respectivas componentes e cores.

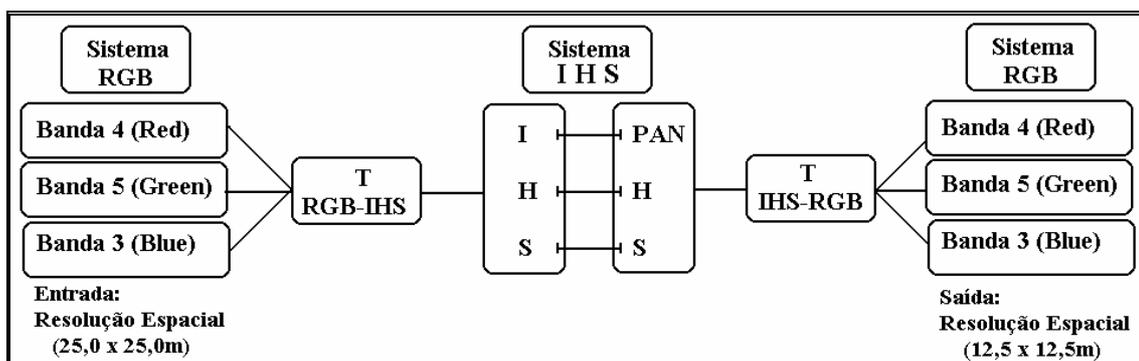


Figura 39 – Transformação RGB-IHS e IHS-RGB.

Concluídas as transformações RGB-IHS e IHS-RGB temos como produto final uma imagem sintética que representa a composição colorida falsa cor, restaurada para 12,5 metros (Anexo VI). Este produto, na forma de imagem, foi utilizado para a interpretação visual e para a obtenção das assinaturas espectrais das classes temáticas, permitindo com isto, a extração visual de amostras de treinamento com maior nível de detalhamento.

### 4.2.3. CLASSIFICAÇÃO

A partir da imagem sintética (composição colorida 4R-5G-3B, falsa cor e restaurada para 12,5 x 12,5 metros), das visitas técnicas e dos levantamentos de campo iniciais com registro de 119 pontos amostrais foram extraídas as assinaturas espectrais das 5 classes temáticas (previamente definidas no item 3.3.6.) como etapa inicial para as classificações. Das assinaturas espectrais das amostras de treinamento obteve-se a amplitude dos níveis de cinza de cada classe, da qual extraiu-se o valor médio para cada uma das 3 bandas utilizadas no processo de classificação. Neste sentido a Tabela 16 denota o comportamento espectral das 5 classes temáticas, especificando os valores mínimos e máximos de nível de cinza das amostras de referência (treinamento), além do valor médio (de maior frequência) para cada uma das classes. A composição, na referida seqüência 4R-5G-3B, conferiu as características de tonalidade, cor, brilho e textura para cada classe, conforme a Tabela 17.

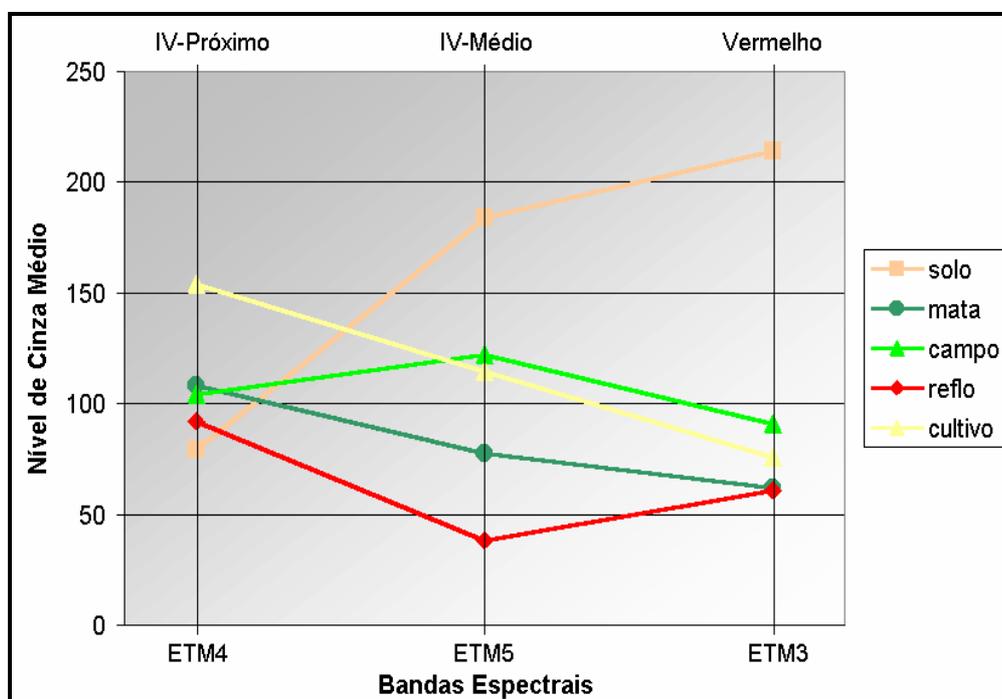
**Tabela 16 – Comportamento Radiométrico das Classes Temáticas.**

Classe Temática	Resposta Radiométrica (Nível de Cinza Mínimo e Máximo)			Resposta Radiométrica (Nível de Cinza Médio)		
	Banda 3 (0,63–0,69 $\mu$ m)	Banda 4 (0,78–0,90 $\mu$ m)	Banda 5 (1,55–1,75 $\mu$ m)	Banda 3 (0,63–0,69 $\mu$ m)	Banda 4 (0,78–0,90 $\mu$ m)	Banda 5 (1,55–1,75 $\mu$ m)
Classe A	185	69	168	214	80	184
Solo	241	86	212			
Classe B	59	102	69	62	109	78
Mata	66	126	88			
Classe C	82	96	116	91	104	122
Campo	96	109	137			
Classe D	57	88	34	60	92	38
Reforest.	63	95	45			
Classe E	66	132	98	76	154	115
Cultivo	81	167	124			

**Tabela 17 – Características das Classes Temáticas.**

CLASSE	TONALIDADE	COR	BRILHO	TEXTURA	Amostras de Referência
Classe A Solo	Clara a média	Azul	Suave à Brillhante	LISA (fina)	
Classe B Mata	Escura	Marrom	Suave	RUGOSA (grosseira)	
Classe C Campo	Clara a média	Verde	Suave	LISA (fina)	
Classe D Reflorestamento	Escura	Vermelho	Brilhante	RUGOSA (grosseira)	
Classe E Cultivo	Clara	Rosa à Branco	Brilho intenso	LISA (fina)	

Das três últimas colunas da Tabela 16 foi possível traçar, sob a forma de gráfico, a síntese do comportamento radiométrico das 5 classes temáticas de uso e cobertura do solo, segundo a composição colorida 453, conforme ilustra a Figura 40.

**Figura 40 – Resposta espectral média das classes temáticas.**

Ainda com relação a definição das *assinaturas espectrais*, cabe mencionar as características (elementos fotointerpretativos) de tamanho, forma, localização e associação das amostras, e de como tais características auxiliaram a classificação temática.

Quanto ao **tamanho** (área) observou-se, conforme já esperado, uma grande variação entre as 5 classes temáticas, sendo evidente o decréscimo acentuado do tamanho das classes na seqüência: mata, campo, reflorestamento, solo e cultivo. Destas cinco classes, as duas primeiras (mata e campo) estão no patamar mais elevado de área, seguido do reflorestamento, num patamar intermediário, e num patamar inferior está a classe solo, seguida da classe cultivo.

Já quanto à **forma** das manchas, a análise foi mais complexa, devido as características intrínsecas dos alvos da área de estudo, da resolução espacial do sensor e da escala de trabalho. Em função disto, esta análise foi prejudicada, mas mesmo assim é possível atribuir a forma regular, que está presente na grande maioria das vezes, para as classes mata e reflorestamento. Enquanto isto, nas demais classes (solo, campo e cultivo) a análise não possibilitou uma definição unívoca quanto às suas formas.

Em relação à **localização** das manchas pode-se inferir *três* situações. Na *primeira* estão as classes *cultivo e reflorestamento*, nas quais a localização mostra-se concentrada. Especificamente para a classe cultivo percebe-se nas partes baixas da sub-bacia, aparecendo mais intensamente após a formação do rio Caeté. Já a classe reflorestamento apresenta-se concentrada apenas em duas regiões, a da madeireira, na porção superior do rio Perito e próximo a sede urbana, no divisor de águas com a sub-bacia do rio Adaga. Na *segunda* estão as classes *mata e campo* que localizam-se distribuídas em toda a área de estudo. Na *terceira* está a classe *solo*, cuja localização apesar de aumentar à medida que se aproxima da sede urbana, aparece distribuída em vários outros pontos da área de estudo.

Quanto à **associação** das manchas observou-se uma relação direta à localização. Desta maneira, notou-se a presença da classe solo em pequenas porções em contato com as áreas de cultivo (indicando início de pousio ou solo preparado para o cultivo) e de reflorestamento (indicando o corte raso das árvores). Outra classe que aparece em associação é a de “campo”, que na maioria das vezes está limitada pela classe mata.

Os elementos interpretativos, descritos na Tabela 17; com as características de tamanho, forma, localização e associação das manchas; somado a resposta espectral média das classes, apresentada na Tabela 16, juntamente com as informações obtidas nas visitas técnicas, com os levantamentos de campo e com o estudo do calendário agrícola da região, forneceram o embasamento necessário para a interpretação visual e classificação temática da imagem. Estes elementos mostram-se essenciais na definição da chave de interpretação para a imagem da composição colorida falsa cor 4R5G3B, bem como possibilitaram uma melhor compreensão da física do imageamento envolvendo o espectro eletromagnético, o comportamento da radiação e, por conseguinte, das respostas radiométricas dos alvos.

A partir das definições acima, que caracterizaram as classes temáticas definindo uma chave de interpretação, pôde-se iniciar o processamento digital das imagens em termos de reconhecimento de padrões, visando a comparação entre técnicas de classificação digital de imagens. Para o reconhecimento de padrões com o objetivo de mapeamento temático do uso e cobertura do solo, empregou-se as técnicas de classificação *pixel a pixel* via algoritmo MaxVer (supervisionado) e *por regiões* via algoritmo IsoSeg (não supervisionado), sendo estas comparadas e avaliadas com os resultados da interpretação visual.

#### **4.2.3.1. Classificador MaxVer**

Na etapa de classificação temática pela técnica supervisionada com o algoritmo MaxVer considerou-se os pontos amostrados em campo, o conhecimento prévio da área de estudo e a variabilidade espectral das classes temáticas. Tal variabilidade, que remete a complexidade natural dos alvos e das classes presentes na área, foi sendo reduzida à medida que amostras das classes eram registradas e amparadas por informações obtidas junto à comunidade local, além de confrontadas com rigor em relação ao calendário agrícola da região.

Duas grandes etapas foram realizadas no processo de classificação supervisionada pelo algoritmo MaxVer: o **treinamento** e a **classificação**. Na primeira etapa, treinamento, foi realizada a coleta de amostras das classes temáticas e a análise estatística destas. Na segunda etapa, classificação, efetuou-se o agrupamento dos *pixels* de acordo com os parâmetros estatísticos das amostras de treinamento e de um limiar de aceitação. Neste contexto foram dois os momentos de intervenção do analista, na definição das **áreas de treinamento** e na escolha do **limiar de aceitação da classificação**, descritos nos itens a seguir.

##### **4.2.3.1.1. Áreas de Treinamento**

Os 119 pontos amostrados nos dois primeiros levantamentos em campo foram incorporados à base cartográfica e sobrepostos na composição colorida 4R-5G-3B, permitindo a localização que, consubstanciada pelas anotações de campo, auxiliou a definição de 32 amostras de áreas homogêneas e representativas para o treinamento do algoritmo de classificação.

O pacote de amostras de treinamento do algoritmo de classificação supervisionada foi avaliado estatisticamente,<sup>43</sup> resultando em dois grupos de amostras: de aquisição e de teste. As amostras de aquisição definiram os parâmetros estatísticos das classes: vetor de médias e matriz

---

<sup>43</sup> Esta avaliação foi realizada mediante a matriz de confusão da classificação, gerada a partir do pacote de amostras de treinamento. Em função dos erros individuais de cada amostra, foram selecionadas (amostras de aquisição) ou excluídas (amostras de teste).

de covariância. E as amostras de teste possibilitaram a verificação do desempenho do classificador, antes de utilizá-lo na classificação da imagem.

A fase de treinamento foi facilitada pela aquisição dos mais de 100 pontos amostrais, que permitiram definir 32 áreas de treinamento, que quando avaliadas pela matriz de confusão, categorizaram-se em 26 amostras do tipo *aquisição* e 6 amostras do tipo *teste*, distribuídas de acordo com as 5 classes temáticas na Tabela 18.

**Tabela 18 – Distribuição das regiões utilizadas na classificação das bandas 3, 4 e 5.**

Classe Temática	Total de Áreas Treinamento (Polígonos)		
	Aquisição	Teste	Total
Classe 1 – Solo	5	2	7
Classe 2 – Mata	2	0	2
Classe 3 – Campo	6	2	8
Classe 4 – Reflorestamento	6	1	7
Classe 5 – Cultivo	7	1	8
<b>Total</b>	<b>26</b>	<b>6</b>	<b>32</b>

#### 4.2.3.1.2. Limiar de Aceitação

A partir do pacote de treinamento, o classificador mensurou os diagramas de dispersão das classes<sup>44</sup> em torno das médias e suas distribuições de probabilidades. De acordo com estes diagramas, o algoritmo avaliou e atribuiu cada *pixel* à classe onde a probabilidade dele pertencer foi a maior. Nas regiões onde as respostas espectrais de duas classes sobrepõem-se, indicando que um determinado “*pixel*” tem igual probabilidade de pertencer as duas classes, foi utilizado o critério de decisão estabelecido pela definição do limiar de aceitação<sup>45</sup>.

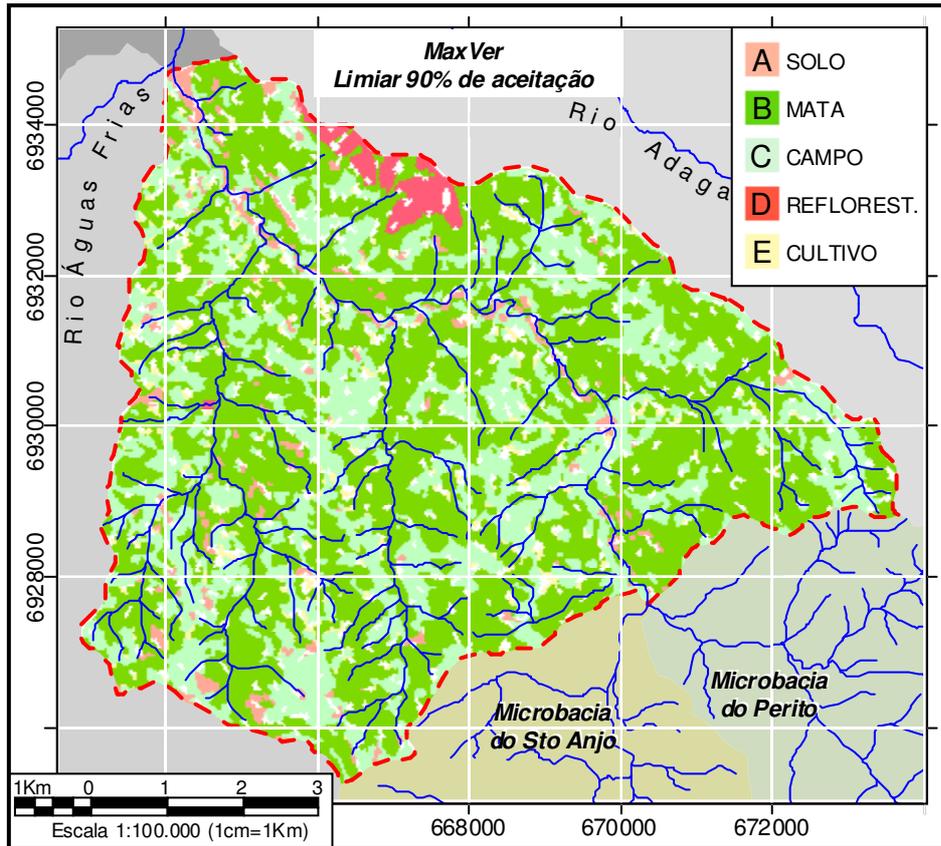
Foram testados todos os limiares de aceitação (100%, 99,9%, 99%, 95%, 90% e 75%) possíveis no aplicativo SPRING. Da análise dos resultados das classificações<sup>46</sup> destes 6 limiares, optou-se pelos que melhor distinguiram as feições da imagem (90% e 95%), permitindo a categorização da imagem nas 5 classes temáticas propostas na legenda.

Numa nova análise específica dos limiares de aceitação 90% e 95%, respectivamente nas Figura 41 e Figura 42, não foram observadas diferenças significativas nos resultados (discriminação das classes) destes dois limiares. Sendo assim, optou-se pela utilização do limiar de aceitação de 95%, em virtude deste requerer menor tempo na fase de edição matricial, além de manter o poder discriminatório das classes de interesse.

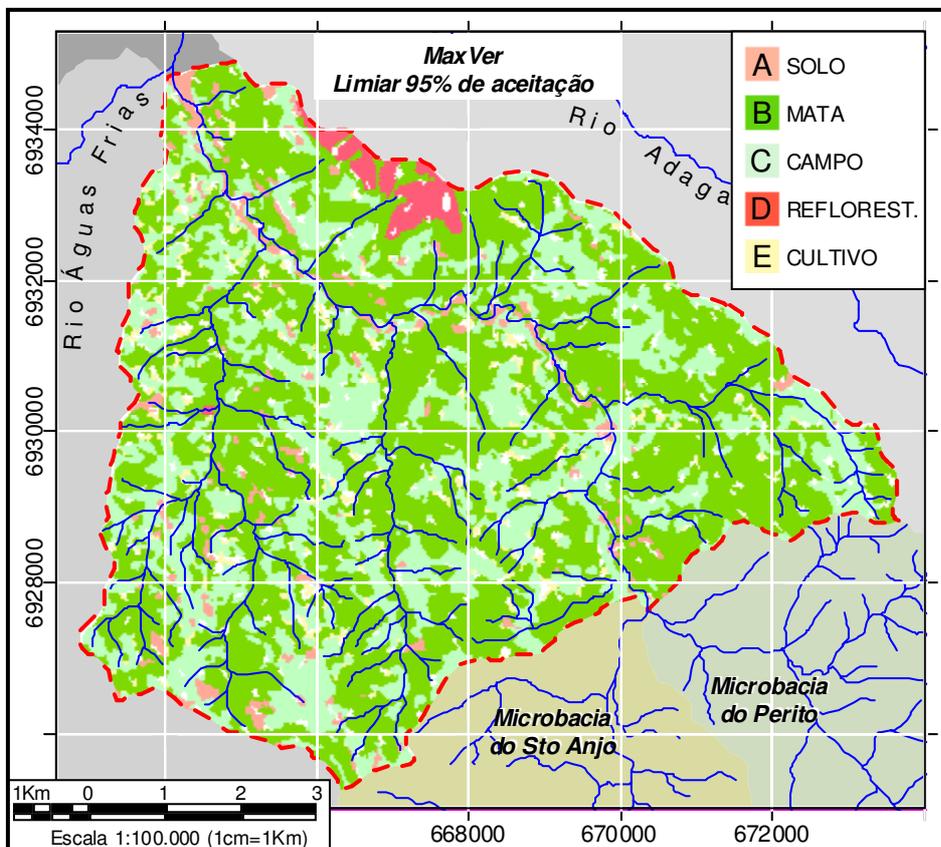
<sup>44</sup> Diagrama de dispersão de probabilidade das classes foi considerado normal, como já discutido.

<sup>45</sup> Conforme visto, segundo (Moreira, 2003) o limiar de aceitação corresponde a uma restrição imposta pelo analista ao sistema de classificação.

<sup>46</sup> Foi realizada uma análise visual minuciosa em relação a discriminação, localização e dimensões das classes geradas. Privilegiou-se a identificação das classes A (solo) e classe E (cultivo) por serem as de maior complexidade espectral.



**Figura 41 – Resultados da classificação temática; aceitação de 90%.**



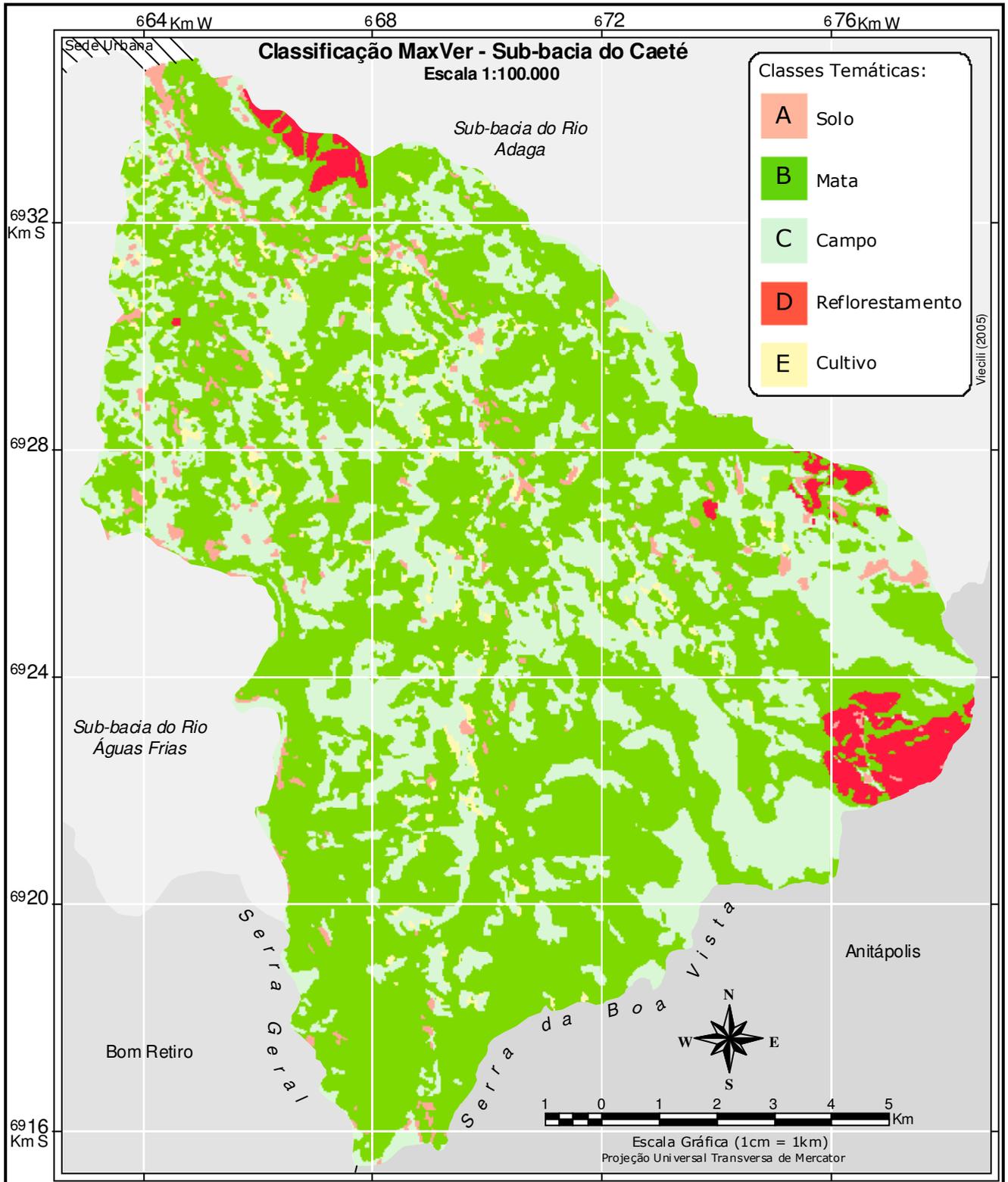
**Figura 42 – Resultados da classificação temática; aceitação de 95%.**

O limiar de 95% engloba 95% dos "pixels" na classificação, sendo que 5% foram ignorados (os de menor probabilidade). Ou seja, “apenas” 5% dos *pixels* não foram classificados, frente aos 10% quando adotado o limiar de aceitação de 90%.

A partir do limiar de aceitação adotado (95%) procedeu-se o mapeamento das classes geradas na imagem classificada, de acordo com as categorias (temas) da legenda pré definida. Então, executou-se a pós classificação, através da edição matricial, visando atribuir classes temáticas para os 5% dos *pixels* não classificados. O resultado da edição matricial da classificação supervisionada utilizando o classificador MaxVer é ilustrado na Figura 43. As respectivas áreas, seus percentuais, número de polígonos e de *pixel* e área média por classe temática, resultantes desta classificação são descritas na Tabela 19.

**Tabela 19 – Estatísticas da classificação supervisionada pelo algoritmo MaxVer.**

Classe	Área			Pixels Número	Polígonos Número	Área Média ha
	km <sup>2</sup>	ha	%			
A - solo	3,80	379,50	2,32	6072	278	1,37
B - mata	99,33	9933,13	60,72	158930	252	39,42
C - campo	52,49	5248,81	32,09	83981	384	13,67
D - reflorest.	4,34	433,94	2,65	6943	17	25,53
E - cultivo	3,64	363,63	2,22	5818	594	0,61
<b>TOTAL</b>	163,59	16359,00	100,00	261744	1525	10,73



**Figura 43 – Mapa gerado pelo algoritmo MaxVer, pós classificado.**

#### 4.2.3.2. Classificador IsoSeg

Para a classificação não supervisionada foi realizada a **segmentação** de bandas de acordo com os limiares de similaridade e área fornecidos pelo analista. A técnica empregada para a **extração das regiões** (agrupamento dos dados da imagem segmentada) foi a de **crescimento de regiões**. Após isto, realizou-se o procedimento de **classificação não supervisionada** via IsoSeg, que é aplicado sobre o conjunto de regiões obtidas na segmentação, em função do **limiar de aceitação** definido pelo analista. Disto resultou uma imagem classificada que necessita ser mapeada segundo as categorias (temas) definidas na legenda temática.

Com relação as questões metodológicas do algoritmo segmentador e do classificador IsoSeg, sumariamente as etapas trilhadas no processo de classificação foram: a) segmentação das imagens; b) classificação digital; c) mapeamento temático; d) pós classificação e edição matricial.

Os três momentos de intervenção do analista remetem ao *processo de segmentação*, a definição do *limiar de aceitação* da classificação e o *mapeamento temático* das classes, descritos respectivamente a seguir.

##### 4.2.3.2.1. Segmentação

A primeira etapa para a classificação digital pelo método IsoSeg contemplou o processo de segmentação. Para tanto foram fornecidas, como informação de entrada<sup>47</sup>, as bandas espectrais e o par de limiares de similaridade radiométrica e área mínima.

Utilizou-se para informação de entrada (intervenção do analista) no processo de segmentação a imagem da banda espectral 3, corrigida quanto a geometria e a radiometria (processada digitalmente), e a imagem razão (RZ45), com efeito topográfico atenuado via operação aritmética entre as bandas 4 e 5.

Quanto à informação referente ao par de limiares<sup>48</sup>, adotou-se a estratégia de grupos de pares de limiares, visando simplificar a investigação dos resultados das combinações. Neste sentido, foram efetuados testes empíricos, considerando a amplitude de variação dos parâmetros de similaridade e área (de 1 a 50, para ambos) e suas possíveis combinações. Optou-se por avaliar 9 níveis de limiares para similaridade e 6 níveis de limiares para área. Foram combinados os limiares 06; 08; 10; 12; 15; 20; 30; 40 e 50 em termos de similaridade

---

<sup>47</sup> Privilegiou-se na seleção das bandas os produtos (imagens) processados que apresentaram os melhores resultados na atenuação do efeito de topográfico (sombreamento).

<sup>48</sup> Conforme consta no item 3.2.3.2.

radiométrica com os limiares 06; 08; 10; 12; 15 e 20 de *pixels* como valor de área mínima, ou seja, tendo o *pixel* um tamanho de 25 metros, o equivalente à 0,3750; 0,5000; 0,6520; 0,7500; 0,9375 e 1,2500 hectares, respectivamente. De um total de 2.500 combinações possíveis Tabela 20, com a estratégia adotada, processou-se “apenas” 36 pares de limiares que originaram 36 imagens segmentadas de acordo com a nomenclatura da Tabela 21.

**Tabela 20 – Espaço de Combinações dos limiares de similaridade e área.**

		Similaridade			
		01	02	...	50
Área Mínima	01	S01A01	S02A01	S...A01	S50A01
	02	S01A02	S02A02	S...A02	S50A02
	...	S01A...	S02A...	S...A...	S50A...
	...	S01A...	S01A...	S...A...	S50A...
	50	S01A50	S02A50	S...A50	S50A50

**Tabela 21 – Combinações de Limiares utilizados no processo de segmentação.**

	S06	S08	S10	S12	S15	S20	S30	S40	S50
A06	S06A06	S08A06	S10A06	S12A06	S15A06	S20A06	S30A06	S40A06	S50A06
A08	S06A08	S08A08	S10A08	S12A08	S15A08	S20A08	S30A08	S40A08	S50A08
A10	S06A10	S08A10	S10A10	S12A10	S15A10	S20A10	S30A10	S40A10	S50A10
A12	S06A12	S08A12	S10A12	S12A12	S15A12	S20A12	S30A12	S40A12	S50A12
A15	S06A15	S08A15	S10A15	S12A15	S15A15	S20A15	S30A15	S40A15	S50A15
A20	S06A20	S08A20	S10A20	S12A20	S15A20	S20A20	S30A20	S40A20	S50A20

As 36 imagens segmentadas, geradas pela técnica de *Crescimento de Regiões*, foram avaliadas por comparação visual<sup>49</sup> através da sobreposição na composição colorida 4R-5G-3B, reamostrada para 12,5 metros. Tal metodologia foi adotada pois, de acordo com Cross *et al.* (1988) *apud* MOREIRA & ASSAD (2003), essa é uma forma qualitativa, mas eficiente para avaliar a segmentação. Da análise visual, observou-se que limiares de similaridade acima de 20 generalizavam por demais as classes temáticas, indicando significativa perda de informações relativas às classes A (solo) e E (cultivo). A análise visual sugere ainda que o limiar de área mínima não deve ultrapassar 0,5ha ( $5.000\text{m}^2 \cong 70\text{m} \times 70\text{m} \cong 50\text{m} \times 100\text{m}$ ), pois não estaria coerente com as dimensões encontradas em campo para a classe cultivo.

Considerando que a área da sub-bacia do Caeté corresponde à 16.359ha (261.744 *pixels*) e a área da cena processada foi de 841 linhas x 721 colunas (606.361 *pixels*), e analisando agora os resultados em termos quantitativos, através do número de polígonos (regiões) obtidos no processo de *extração de regiões*, conforme a Tabela 22, observa-se que o número regiões variou entre 2.521 (S50A20) à 79.422 (S06A06).

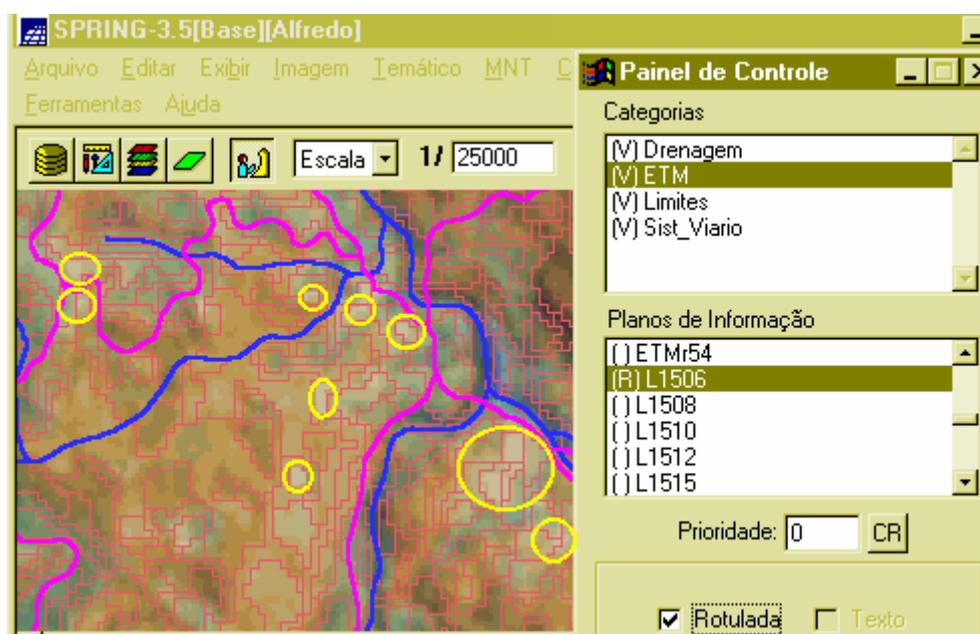
<sup>49</sup> A análise privilegiou os resultados cujo as classes temáticas representaram a realidade de campo na data imageamento.

**Tabela 22 – Número de regiões obtidos da extração de regiões.**

	S06	S08	S10	S12	S15	S20	S30	S40	S50
A06	79422	75923	70212	63592	53465	38565	18528	9202	5147
A08	64445	61831	57503	52339	44328	32503	15980	8058	4527
A10	53084	51126	47835	43766	37425	27784	13980	7158	4038
A12	44042	42629	40138	36988	31901	24029	12291	6344	3556
A15	34613	33714	31977	29665	25944	19890	10509	5489	3090
A20	25146	24674	23688	22295	19790	15535	8500	4513	2521

Estes valores, quando avaliados em conjunto com a análise visual, indicaram como mais significativo o par de limiares 15 e 06 para similaridade e área, respectivamente. A Figura 44 apresenta, para esta configuração de limiares, a imagem rotulada (regiões segmentadas) sobreposta à composição colorida 453, na escala 1:25.000. De acordo com a resolução espacial (25m) das bandas, este limiar significa que a área mínima considerada no processo de segmentação equivale a 0,375ha no terreno (ou ainda,  $3.750\text{m}^2 \cong 61\text{m} \times 61\text{m} \cong 37\text{m} \times 100\text{m}$ ), sendo coerente com a resolução espacial do sensor (agrupamento mínimo de 6 *pixels*).

Nesta figura é possível observar os conjuntos de *pixels* homogêneos, com características estatísticas internas semelhantes, que representam o particionamento das bandas de entrada. As áreas destacadas, por círculos em amarelo, referem-se à classe cultivo.



**Figura 44 – Imagem rotulada (regiões segmentadas) para similaridade 15 de níveis de cinza e 6 para área mínima, sobreposta a composição colorida 453, na escala 1:25.000.**

O passo seguinte foi a classificação, onde o algoritmo IsoSeg classificou as regiões da imagem segmentada (Figura 44) sem utilizar nenhum conhecimento “*a priori*” sobre as classes existentes na imagem.

#### 4.2.3.2.2. O Limiar de Aceitação e a Classificação Temática

A partir dos dois levantamentos de campo iniciais e dos 119 pontos registrados foi possível identificar 41 regiões das 34.613 geradas no processo de segmentação<sup>50</sup> da imagem S15A06. Confrontando a composição colorida 4R-5G-3B com as regiões geradas pelo segmentador extraiu-se, das 41 regiões, 33 amostras de aquisição e 8 amostras de teste, após a análise estatística da classificação<sup>51</sup>. A Tabela 23 discrimina o tipo e o número de amostras selecionadas para cada classe temática utilizada na análise estatística prévia da classificação.

**Tabela 23 – Distribuição das regiões (áreas de treinamento) utilizadas no processo de avaliação da confusão da classificação.**

Classe Temática	AMOSTRA		
	Aquisição	Teste	Total
Classe 1 – Solo	6	2	8
Classe 2 – Mata	4	1	5
Classe 3 – Campo	8	2	10
Classe 4 – Reflorestamento	7	2	9
Classe 5 – Cultivo	8	1	9
<b>TOTAL</b>	<b>33</b>	<b>8</b>	<b>41</b>

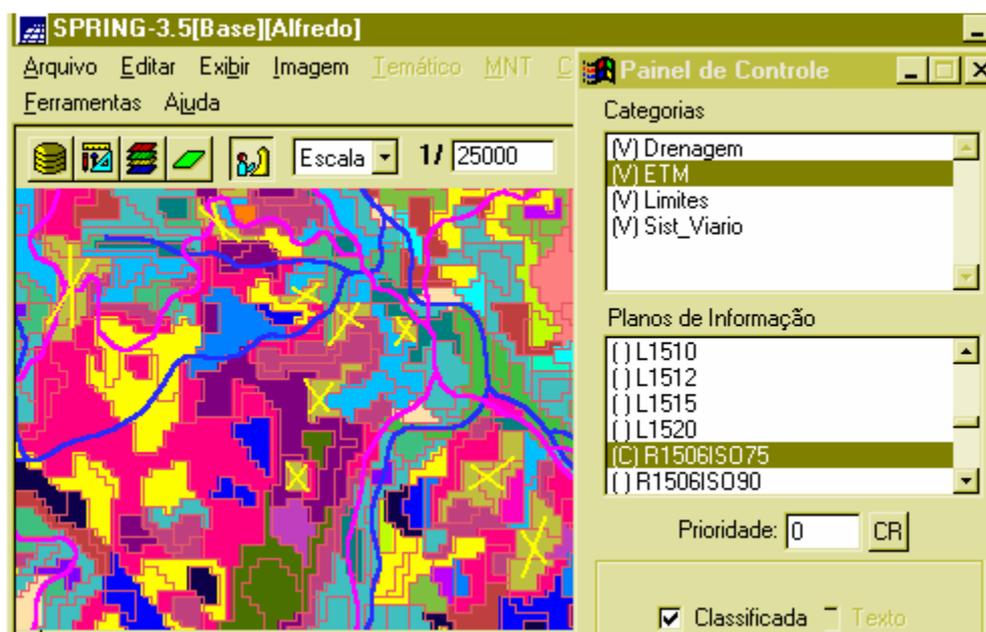
A análise estatística prévia forneceu a matriz de confusão da classificação, de acordo com as amostras fornecidas (Tabela 23). A partir do par de limiares de similaridade e área (S15A06), definido como o mais adequado, foram automaticamente extraídas as regiões da imagem segmentada correspondente, de acordo com a especificação pelo analista do limiar de aceitação<sup>52</sup> para a separação ou o agrupamento de classes distintas.

Neste sentido, aplicou-se o algoritmo de classificação não supervisionado IsoSeg sobre as 34.613 regiões da imagem segmentada (S15A6), utilizando todos os limiares de aceitação (99,9%, 99%, 95%, 90% e 75%) possíveis no aplicativo Spring, resultando em 24, 27, 30, 32 e 35 classes, respectivamente. A partir da análise visual das classes geradas nas imagens classificadas, conforme ilustram as Figura 45 e Figura 46, pode-se perceber o elevado poder discriminatório da classe E (cultivo) para o limiar 75%, enquanto a separabilidade desta classe foi generalista para o limiar 99%. Na Figura 45 as áreas identificadas como cultivo estão destacadas por “cruzes” em amarelo, enquanto na Figura 46 as áreas correspondentes à esta classe estão delimitadas pelo contorno amarelo nos polígonos.

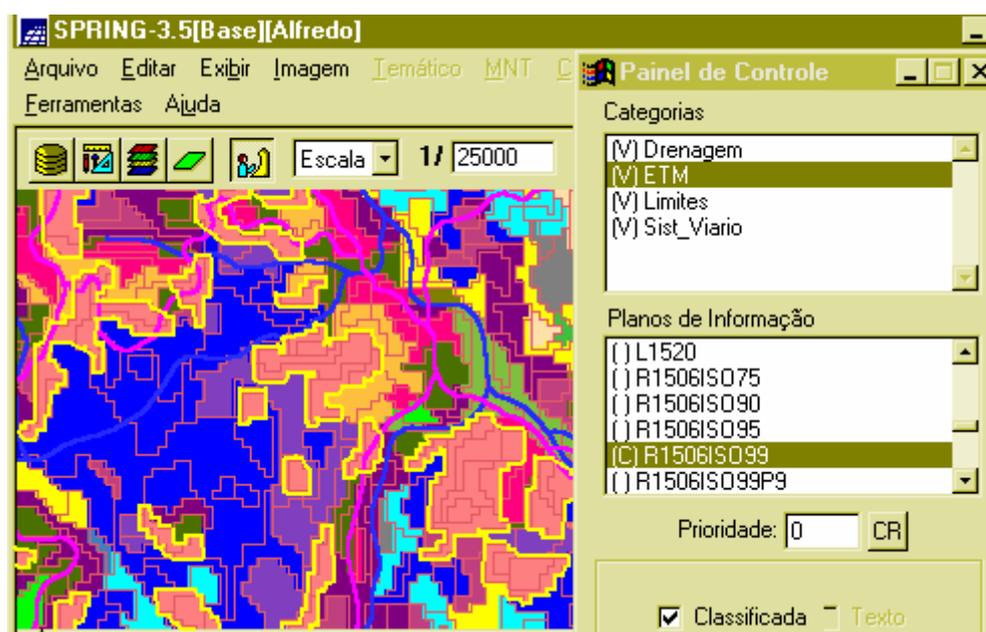
<sup>50</sup> Veja a Tabela 22.

<sup>51</sup> Cabe aqui ressaltar que a análise estatística da classificação do algoritmo IsoSeg difere do algoritmo MaxVer. Enquanto para o MaxVer foi utilizado amostras do tipo poligonal traçadas pelo usuário, no IsoSeg as amostras foram “selecionadas” dentre as 34.613 regiões delimitadas na segmentação.

<sup>52</sup> O limiar de aceitação traduz em número o quão afastada do centro de uma classe pode estar uma região para que seja considerada como pertencente a esta classe. Em consequência, a magnitude estabelecida para o limiar de aceitação determina o número de classes a serem geradas pelo algoritmo.



**Figura 45 – Imagem classificada com aceitação de 75% a partir da imagem segmentada S15A06.**



**Figura 46 – Imagem classificada com aceitação de 99% a partir da imagem segmentada S15A06.**

Dentre os limiares de aceitação testados, o que obteve maior aproveitamento em termos quantitativos também foi o limiar de 75%, uma vez que individualizou o maior número de classes na imagem (veja Anexo III).

Concluída a avaliação visual (análise qualitativa) e a avaliação do número de classes geradas (análise quantitativa), adotou-se o limiar de aceitação de 75%, pois foi o mais rigoroso na inclusão de uma região para determinada classe, gerando entretanto, o maior número de áreas não classificadas. A imagem resultante da classificação IsoSeg com este limiar permitiu a discriminação de todas as 5 classes temáticas propostas na legenda previamente definida.

Da análise específica da imagem classificada escolhida (com similaridade de 15 níveis de cinza, área mínima de 06 *pixels* e limiar de aceitação de 75%) obteve-se 35 classes para o algoritmo IsoSeg. A partir desta categorização foi executado o mapeamento para classes, donde 15 corresponderam a classe B (mata), 12 representaram a classe C (campo), 4 a classe A (solo), 3 a classe D (reflorestamento) e 1 a classe D (cultivo).

Após o mapeamento temático das 35 classes para as 5 categorias da legenda pré definida, procedeu-se a pós-classificação dos *pixels* não classificados. O resultado da edição matricial da classificação não supervisionada utilizando o classificador ISOSEG é apresentado na Figura 47. As respectivas áreas, seus percentuais, número de polígonos e de *pixel* e área média por classe temática, resultantes desta classificação, são descritas na Tabela 24.

**Tabela 24 – Estatísticas da classificação não supervisionada pelo algoritmo IsoSeg.**

Classe	Área			Pixels Número	Polígonos Número	Área Média ha
	km <sup>2</sup>	ha	%			
A - solo	3,58	358,38	2,19	5734	132	2,71
B - mata	85,42	8542,44	52,22	136679	121	70,60
C - campo	68,37	6837,13	41,79	109394	154	44,40
D - reflorest.	3,43	343,19	2,10	5491	12	28,60
E - cultivo	2,78	277,88	1,70	4446	111	2,50
<b>TOTAL</b>	163,59	16359,00	100,00	261744	530	30,87

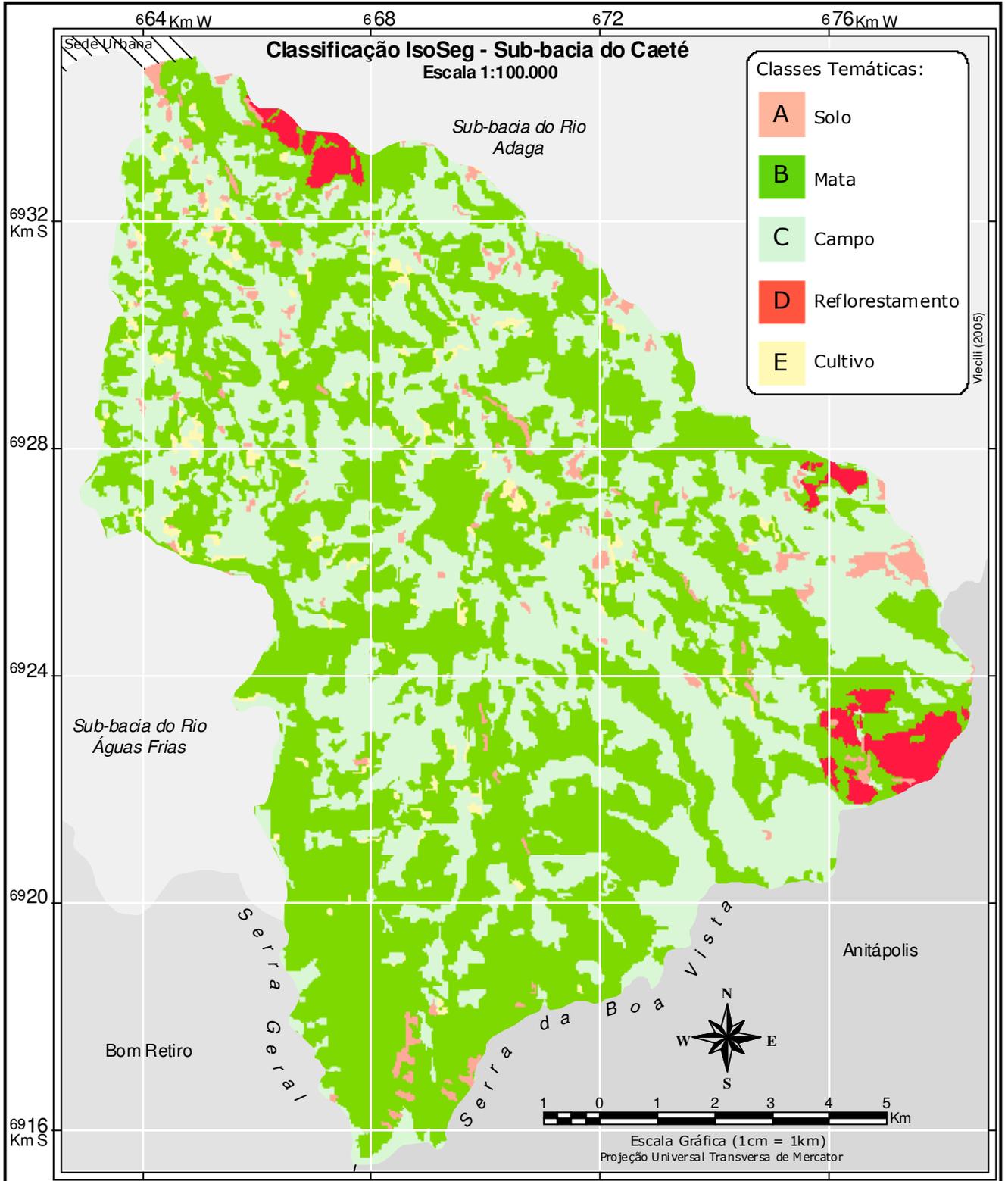


Figura 47 – Mapa gerado pelo algoritmo IsoSeg, pós classificado.

#### 4.2.3.3. *Classificação Visual*

A interpretação visual, classificação não automática, considerou na análise a convergência de evidências em relação aos elementos tonalidade/cor e textura (aspectos espectrais); tamanho, forma, distribuição e associação das classes (aspectos espaciais). A análise integrada destes aspectos, apoiada pela experiência do fotointérprete<sup>53</sup>, facilitou a compreensão da física do imageamento e contribuiu para fundamentar a extração de informações das imagens destes atributos de contexto.

As 5 classes da legenda temática pré-definida engendraram a chave de interpretação, fornecendo o esquema conceitual (roteiro) para interpretação visual, que deu-se por intermédio de um processo dedutivo, apoiado por informações consuetudinárias.

A interpretação visual da imagem teve como base a composição colorida 4R-5G-3B<sup>54</sup>, reamostrada para 12,5 metros na data do imageamento (10-03-2002), bem como, novamente, as informações complementares obtidas nos levantamentos de campo. Assim, quando no campo observou-se áreas com alterações de uso ou ocupação em relação à data da imagem, recorreu-se às informações complementares a fim de identificar não apenas a classe atual, mas sim a referente à março de 2002. Neste sentido, foram realizadas duas saídas à campo, concomitante à interpretação visual, as quais permitiram reduzir as incertezas quanto à interpretação, além de viabilizar a amostragem de pontos referentes as 5 classes temáticas.

Os pontos amostrados em campo, via GPS, foram convertidos para diferentes planos de informação (do tipo ponto), de acordo com a data (e turno) de registro. Procedeu-se então, a análise de sua localização quanto ao contexto de vizinhança e as informações anotadas em caderneta de campo. Avaliou-se, neste sentido, a representatividade de cada ponto registrado, por intermédio de recursos de ampliação de imagem em tela em vários níveis de escala (até 1:5.000), adotando a visualização 1:10.000 como limite recomendável para análise conclusiva da validade do ponto amostrado.

Assim, após a identificação de cada ponto referente a determinada classe temática, atribui-se rótulos aos pontos, segundo a legenda temática, indicando a correspondência da classe num novo plano (este somente com os pontos validados). Igualmente a Nascimento *et al.* (2003), as dificuldades encontradas no processo de fotointerpretação das imagens foram inversamente proporcionais às dimensões das áreas. Assim, a classe B (mata) e C (campo) apresentaram maior facilidade para o mapeamento, bem como, as classes D (reflorestamento),

---

<sup>53</sup> Item 3.3.5.

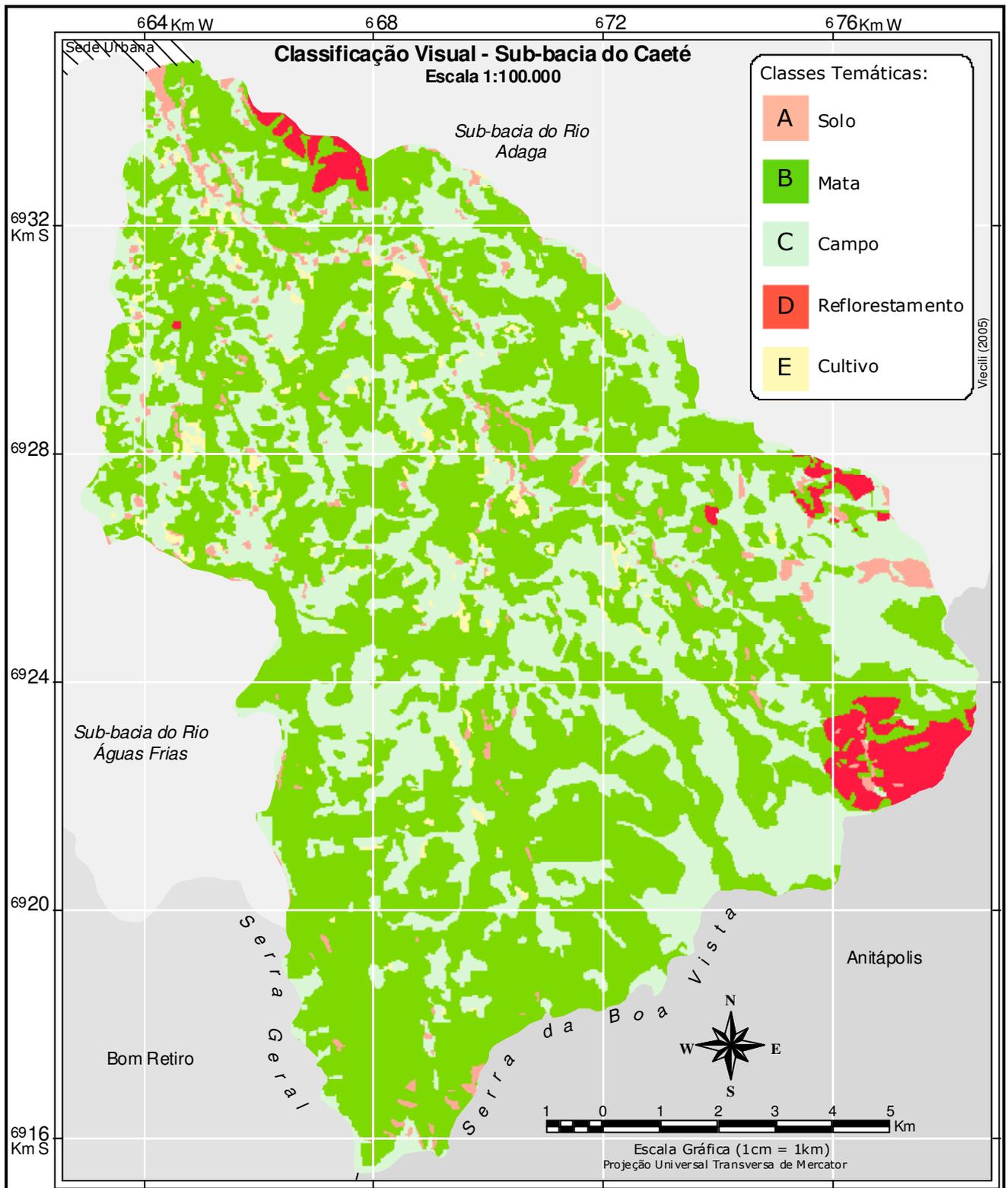
<sup>54</sup> FLORENZANO (1993) conclui em termos gerais, que a combinação 4R-5G-3B é a que apresenta os melhores resultados dentre várias combinações testadas a partir de imagens do Landsat.

A (solo) e E (cultivo) foram respectivamente aquelas de maior dificuldade na categorização, devido a já discutida complexidade intrínseca destes alvos. Este fato observado principalmente nas classes A (solo) e E (cultivo), deve-se à forma irregular e ocorrência limitada por dimensões relativamente pequenas, quando comparadas as classes B (mata), C (campo) e D (reflorestamento).

Nesta classificação, que envolveu como procedimentos de interpretação a fase de leitura (identificação dos pontos amostrados) e a fase de análise (relação entre os alvos e as 5 classes temáticas), o resultado obtido foi a generalização da imagem nas cinco classes temáticas propostas. Ou seja, o produto gerado foi uma imagem que simplificou as complexas respostas (informações) dos alvos, sendo apresentada na Figura 48. As respectivas áreas, seus percentuais, número de polígonos e de *pixel* e área média por classe temática, resultantes desta classificação são descritas na Tabela 25.

**Tabela 25 – Estatísticas da classificação visual.**

Classe	Área			Pixels	Polígonos	Área Média
	km <sup>2</sup>	ha	%	Número	Número	ha
A - solo	3,69	369,38	2,26	5910	264	1,40
B - mata	94,93	9492,63	58,03	151882	148	64,14
C - campo	57,64	5764,06	35,23	92225	176	32,75
D - reflorest.	4,26	425,69	2,60	6811	12	35,47
E - cultivo	3,07	307,25	1,88	4916	276	1,11
<b>TOTAL</b>	163,59	16359,00	100,00	261744	876	18,67



**Figura 48 – Mapa gerado pelo algoritmo IsoSeg, pós classificado.**

#### 4.2.3.4. Pós Classificação

A partir dos resultados (imagem classificada) oriundos da etapa de classificação, procedeu-se o *Mapeamento* das classes geradas de acordo com as 5 categorias da legenda temática definida no *Modelo de Dados*<sup>55</sup> do Spring.

Visando melhorar a “aparência visual” das imagens classificadas, através da eliminação de pequenos polígonos (áreas) isolados ou não classificados (em função do limiar de aceitação adotado), procedeu-se a edição matricial como etapa de pós classificação. A edição matricial permitiu a correção dos pontos duvidosos, inserindo-os num contexto espacial compatível com a escala, através da dissociação e associação à determinado tema, apoiada nas respostas da composição colorida e de outros produtos obtidos no processamento digital de imagens, por intermédio da ferramenta *acoplamento de tela* disponível no aplicativo.

Disto, resultaram imagens onde todos os *pixels* (100%) estão atribuídos nas 5 classes temáticas. Então, nessas imagens foram aplicados filtros para a uniformização<sup>56</sup> das classes obtidas. A uniformização das categorias distintas foi efetuada após alguns testes, por intermédio do *filtro linear* do tipo *passa baixa* de média 3x3 e 5x5. Estes filtros suavizaram as imagens de saída através da supressão e/ou aglutinação das áreas, de acordo com máscaras (matrizes de *pixels*) comparadas em relação ao contexto de vizinhança. Isto forneceu uma maior legibilidade aos mapas temáticos ao simplificar (suprimir e/ou aglutinar) as representações de classes isoladas, dando a idéia de homogeneização dos dados.

Como resultado observou-se uma melhoria no aspecto visual das classificações, entretanto os *pixels* classificados isoladamente foram eliminados após análise com o contexto da vizinhança (máscaras 3x3 e 5x5), acarretando alterações quantitativas das áreas por classe (conforme Tabela 23, Tabela 24 e Tabela 25), além de reduzir significativamente o número de polígonos por classe.

Os filtros passa-baixa de média 3x3 e 5x5 foram aqui denominados de filtro1 e filtro2, respectivamente. O filtro 1 foi aplicado sobre os resultados das 3 classificações (Visual, MaxVer, IsoSeg), e o filtro 2 apenas para as classificações digitais (MaxVer, IsoSeg). Em virtude da classificação visual ter sido realizada a partir da composição colorida (reamostrada para *pixels* de 12,5metros), além de ser empregada no presente para avaliação das classificações digitais, optou-se por aplicar apenas o filtro 1 para os resultados da interpretação visual.

---

<sup>55</sup> No *Modelo de Dados* são definidas e armazenadas as características de apresentação gráfica (aspectos visuais) dos planos de informação dos dados (pontos, linhas, áreas e textos).

<sup>56</sup> A uniformização consiste na substituição da classe de pontos isolados, de acordo com a frequência das classes (temas) em sua vizinhança (análise do ponto central a partir de janelas de "*pixels*" 3x3 e 5x5).

Assim, a aplicação de filtros a partir dos 3 mapas temáticos produzidos (Visual, MaxVer, IsoSeg), georeferenciados em nível do Caeté, originaram:

- ✓ 3 classificações filtradas por janelas de *pixel* 3x3: Visual<sub>filtro1</sub>, MaxVer<sub>filtro1</sub>, IsoSeg<sub>filtro1</sub>; e
- ✓ 2 classificações filtradas por janelas de *pixel* 5x5; MaxVer<sub>filtro2</sub>, IsoSeg<sub>filtro2</sub>;

cujos resultados são avaliados e apresentados no item subsequente.

Concluídas as operações de filtragem, as imagens resultantes foram transformadas para planos de informações do tipo temático, podendo agora ser visualizadas tanto na forma de imagem (*pixels*, matricial) quanto temática (polígonos, vetorial).

#### 4.2.4. AVALIAÇÃO DA CLASSIFICAÇÃO

Com o objetivo de avaliar a confiabilidade das diferentes técnicas testadas e empregadas no presente estudo, para o mapeamento temático do uso e cobertura do solo, é necessária e fundamental, como etapa conclusiva, uma análise criteriosa quanto à acurácia dos produtos gerados. Neste sentido, para a avaliação das classificações temáticas e respectivas derivações contemplou-se: a) a análise visual, b) a análise de parâmetros estatísticos e c) a estimativa da acurácia.

A análise visual e de parâmetros estatísticos, de determinada classificação temática, permite avaliar apenas um mapa temático isoladamente, independentemente dos resultados das demais técnicas. Já a estimativa da acurácia está fundamentada nos índices e coeficientes de exatidão, possibilitando a avaliação da concordância entre dois mapas temáticos (uma classificação de referência ou verdade terrestre, cruzado tabularmente com uma classificação dita em análise). A estimativa da acurácia tem por finalidade qualificar os diferentes produtos gerados, segundo coeficientes de concordância, o que permite categorizar a confiabilidade dos mapeamentos de acordo com a tabela de referência proposta por Landis e Koch (1977) e adaptada por Fleiss (1981)<sup>57</sup>. A análise conjunta entre as diferentes técnicas é detalhada no item seguinte, “Coeficiente de Concordância Kappa” derivado da tabulação cruzada entre dois mapas e reportados numa matriz de confusão.

Entretanto, precede a análise entre as concordâncias das classificações, a análise quantitativa das classificações temáticas. Neste sentido, a seguir são apresentados e discutidos os resultados da análise visual e dos parâmetros estatísticos (vinculados à escala) das 3 técnicas de classificação temática de uso e cobertura do solo empregados, bem como de suas derivações (Visual<sub>filtro1</sub>, MaxVer<sub>filtro1</sub>, MaxVer<sub>filtro2</sub>, IsoSeg<sub>filtro1</sub> e IsoSeg<sub>filtro2</sub>);).

---

<sup>57</sup> Tabela 08.

Sendo assim, para validar os mapas temáticos gerados e comparar os resultados obtidos pelas técnicas empregadas, procedeu-se inicialmente uma análise visual nestes produtos. Esta privilegiou a legibilidade dos mapeamentos e o poder discriminatório das classes temáticas, de acordo com a composição colorida utilizada como referência. Após esta investigação visual preliminar foram observadas as estatísticas das classificações, contemplando a análise dos valores de área, área mínima e área média das classes temáticas, além do número de polígonos resultantes de cada técnica de classificação.

Em termos de percentual de áreas classificadas, a Figura 49 denota as variações existentes entre as cinco classes temáticas, para as três técnicas de classificação empregadas. De acordo a análise dos valores de cada técnica, observou-se variações internas na mesma classe, para as três técnicas, no patamar de 20% do total classificado para as classes C (campo), D (reflorestamento) e E (cultivo); 14% para a classe B (mata), e menor variação para a classe A (solo) na faixa de 5%.

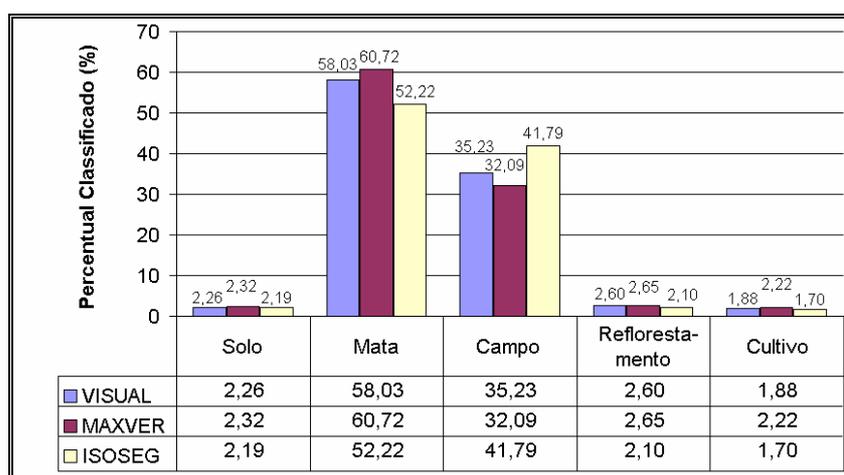


Figura 49 – Comparativo entre percentual de áreas classificadas em cada tema.

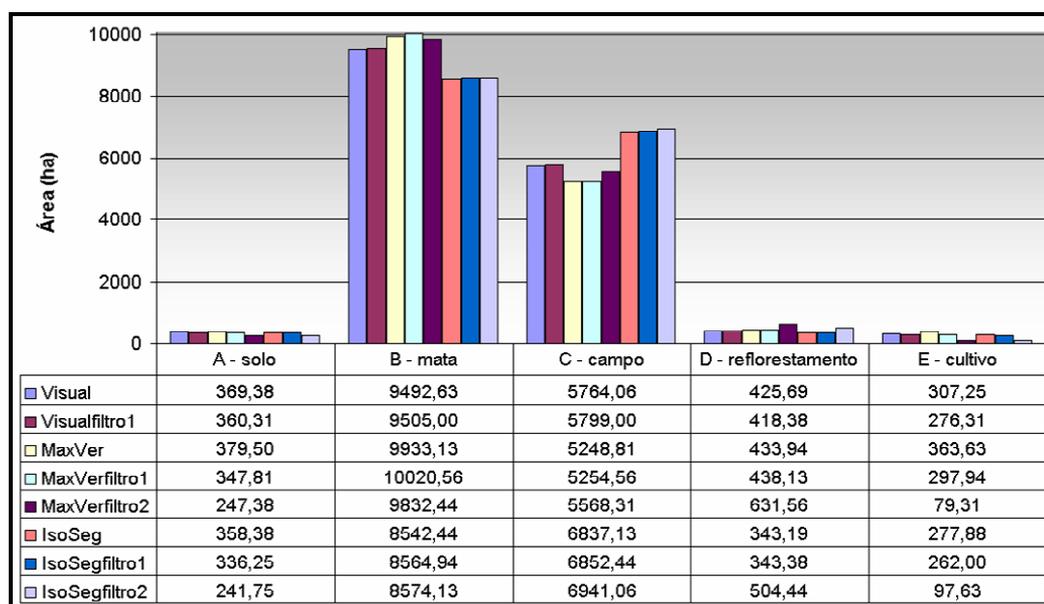


Figura 50 – Área classificada para cada classe em cada técnica.

Já a Figura 50 descreve os valores em hectares das áreas classificadas, segundo as técnicas empregadas e suas derivações. A partir destes valores foi realizada a conversão da área total de cada classe para o equivalente em número de *pixels*, obtendo-se então a relação entre a média de *pixels* existentes em função do número de polígonos de cada classe, conforme a Tabela 26.

**Tabela 26 – Média do número de *pixels* e número de polígonos por classe.**

	A		B		C		D		E		Resumo	
	solo		mata		campo		reflorestamento		cultivo		Média	Total
	pixel	polígonos	pixel	polígonos	pixel	polígonos	pixel	polígonos	pixel	polígonos	pixel	polígonos
Visual	22,39	264	1026,23	148	524,01	176	567,58	12	17,81	276	298,79	876
Visualfiltro1	25,48	226	1333,97	114	653,44	142	744,56	9	18,67	237	359,54	728
MaxVer	21,84	278	630,67	252	218,70	384	408,41	17	9,79	594	171,64	1525
MaxVerfiltro1	23,78	234	965,84	166	254,00	331	500,71	14	11,95	399	228,80	1144
MaxVerfiltro2	25,70	154	1417,29	111	317,06	281	842,08	12	14,59	87	405,80	645
IsoSeg	43,44	132	1129,58	121	710,35	154	457,58	12	40,05	111	493,86	530
IsoSegfiltro1	44,46	121	1223,56	112	730,93	150	499,45	11	41,50	101	528,78	495
IsoSegfiltro2	47,17	82	1399,86	98	787,64	141	1008,88	8	26,47	59	674,60	388

Da Figura 50 obtêm-se os valores de área máxima e mínima classificadas respectivamente, segundo a técnica. Para a classe A: 379,50ha (MaxVer) e 241,75ha (IsoSeg<sub>filtro2</sub>), classe B: 10020,56ha (MaxVer<sub>filtro1</sub>) e 8542,44ha (IsoSeg), classe C: 6941,06ha (IsoSeg<sub>filtro2</sub>) e 5248,81ha (MaxVer), classe D: 631,56ha (MaxVer<sub>filtro2</sub>) e 343,19ha (IsoSeg), classe E: 363,63ha (MaxVer) e 79,31ha (MaxVer<sub>filtro2</sub>). A análise destes indica variações significativas entre o total classificado em cada classe, para cada técnica, destacando-se a amplitude de variação de área para a classe E, onde a maior área classificada, 363,63ha (MaxVer), é mais que quatro vezes a menor, 79,31ha (MaxVer<sub>filtro2</sub>); e a classe D apresenta 80% de variação entre o maior e o menor valor classificado.

A Tabela 26 denota elevado número médio de *pixels* e de polígonos para as classes B (mata) e C (campo), indicando regiões de áreas de dimensões elevadas, quando comparada ao reduzido número médio de *pixels* observado nas classes A (solo) e E (cultivo), conferindo regiões de áreas de pequenas dimensões.

Já as Tabela 27, Tabela 28 e Tabela 29 sintetizam os resultados das 3 técnicas de classificação, apresentando os valores quantitativos de área e área média (em hectares) e o número de polígonos gerados para cada uma das cinco classes temáticas, comparando com suas derivadas da operação de filtragem.

**Tabela 27 – Comparativo entre a classificação visual e sua derivada filtrada.**

Classe	Visual			Visual <sub>filtro1</sub>		
	Área (ha)	Polígonos (Número)	Área Média (ha)	Área (ha)	Polígonos (Número)	Área Média (ha)
A - solo	369,38	264	1,40	360,31	226	1,59
B - mata	9492,63	148	64,14	9505,00	114	83,38
C - campo	5764,06	176	32,75	5799,00	142	40,84
D - reflorestamento	425,69	12	35,47	418,38	9	46,49
E - cultivo	307,25	276	1,11	276,31	237	1,17
<b>TOTAL</b>	<b>16359,00</b>	<b>876</b>	<b>18,67</b>	<b>16359,00</b>	<b>728</b>	<b>22,47</b>

**Tabela 28 – Comparativo entre as classificações MaxVer, MaxVer<sub>filtro1</sub> e MaxVer<sub>filtro2</sub>.**

Classe	MaxVer			MaxVer <sub>filtro1</sub>			MaxVer <sub>filtro2</sub>		
	Área (ha)	Polígonos (Número)	Área Média (ha)	Área (ha)	Polígonos (Número)	Área Média (ha)	Área (ha)	Polígonos (Número)	Área Média (ha)
A - solo	<b>379,50</b>	<b>278</b>	<b>1,37</b>	<b>347,81</b>	<b>234</b>	<b>1,49</b>	<b>247,38</b>	<b>154</b>	<b>1,61</b>
B - mata	<b>9933,13</b>	<b>252</b>	<b>39,42</b>	<b>10020,56</b>	<b>166</b>	<b>60,36</b>	<b>9832,44</b>	<b>111</b>	<b>88,58</b>
C - campo	<b>5248,81</b>	<b>384</b>	<b>13,67</b>	<b>5254,56</b>	<b>331</b>	<b>15,87</b>	<b>5568,31</b>	<b>281</b>	<b>19,82</b>
D - reflorest	<b>433,94</b>	<b>17</b>	<b>25,53</b>	<b>438,13</b>	<b>14</b>	<b>31,29</b>	<b>631,56</b>	<b>12</b>	<b>52,63</b>
E - cultivo	<b>363,63</b>	<b>594</b>	<b>0,61</b>	<b>297,94</b>	<b>399</b>	<b>0,75</b>	<b>79,31</b>	<b>87</b>	<b>0,91</b>
<b>TOTAL</b>	<b>16359,00</b>	<b>1525</b>	<b>10,73</b>	<b>16359,00</b>	<b>1144</b>	<b>14,30</b>	<b>16359,00</b>	<b>645</b>	<b>25,36</b>

**Tabela 29 – Comparativo entre as classificações IsoSeg, IsoSeg<sub>filtro1</sub> e IsoSeg<sub>filtro2</sub>.**

Classe	IsoSeg			IsoSeg <sub>filtro1</sub>			IsoSeg <sub>filtro2</sub>		
	Área (ha)	Polígonos (Número)	Área Média (ha)	Área (ha)	Polígonos (Número)	Área Média (ha)	Área (ha)	Polígonos (Número)	Área Média (ha)
A - solo	<b>358,38</b>	<b>132</b>	<b>2,71</b>	<b>336,25</b>	<b>121</b>	<b>2,78</b>	<b>241,75</b>	<b>82</b>	<b>2,95</b>
B - mata	<b>8542,44</b>	<b>121</b>	<b>70,60</b>	<b>8564,94</b>	<b>112</b>	<b>76,47</b>	<b>8574,13</b>	<b>98</b>	<b>87,49</b>
C - campo	<b>6837,13</b>	<b>154</b>	<b>44,40</b>	<b>6852,44</b>	<b>150</b>	<b>45,68</b>	<b>6941,06</b>	<b>141</b>	<b>49,23</b>
D - reflorest	<b>343,19</b>	<b>12</b>	<b>28,60</b>	<b>343,38</b>	<b>11</b>	<b>31,22</b>	<b>504,44</b>	<b>8</b>	<b>63,06</b>
E - cultivo	<b>277,88</b>	<b>111</b>	<b>2,50</b>	<b>262,00</b>	<b>101</b>	<b>2,59</b>	<b>97,63</b>	<b>59</b>	<b>1,65</b>
<b>TOTAL</b>	<b>16359,00</b>	<b>530</b>	<b>30,87</b>	<b>16359,00</b>	<b>495</b>	<b>33,05</b>	<b>16359,00</b>	<b>388</b>	<b>42,16</b>

Das Tabela 27, Tabela 28 e Tabela 29 pode-se observar o acréscimo nos valores de área média e a redução do número de polígonos total e por classe para todas as classificações derivadas da operação de filtragem. O número de polígonos variou significativamente, sendo a classificação MaxVer a que gerou maior número (1525 polígonos) e a classificação IsoSeg<sub>filtro2</sub> a que gerou menor número (388 polígonos). O número de polígonos foi reduzido: de 876 para 728, na classificação visual em relação a derivada filtrada; de 1525 para 1144 para 645, na classificação MaxVer em relação à aplicação do filtro1 e filtro2, respectivamente; e, de 530 para 495 para 388, na classificação IsoSeg em relação as derivadas (filtro1 e filtro2).

Em termos de área classificada por classe, pôde-se observar nestas tabelas que:

- ✓ Para todas as situações, os valores de áreas das classes A (solo) e E (cultivo) diminuem na medida que são aplicados os filtros, indicando a supressão dos polígonos de dimensões reduzidas.

- ✓ Para a classificação visual, os valores de áreas das classes B (mata) e C (campo) aumentam, enquanto a classe D (reflorestamento) diminui com a aplicação dos filtros, sugerindo agregação de polígonos isolados das classes A, D e E para as classes B e C.
- ✓ Para a classificação MaxVer, o valor de área da classe B (mata) aumenta com a aplicação do filtro1 e diminui com filtro2. Ou seja, para o filtro de janela 3x3, os polígonos são predominantemente agregados e, para janela 5x5 são suprimidos em geral, com base na vizinhança definida pela máscara (janela).
- ✓ Para a classificação MaxVer, os valores de áreas das classes C (campo) e D (reflorestamento) aumentam com aplicação de ambos os filtros, indicando acréscimo de áreas vizinhas isoladas em relação ao contexto.
- ✓ Para a classificação IsoSeg, os valores de áreas das classes B (mata), C (campo) e D (reflorestamento) aumentam com a aplicação dos filtros, indicando a agregação das pequenas áreas isoladas referentes às classes A e E.

Da análise dos histogramas das classificações, extraiu-se o menor valor de área para cada classe e para cada classificação, sendo que o menor valor obtido correspondeu a classe E (cultivo) em todos os casos.

É ainda relevante para a análise, o estudo da distribuição do número de polígonos de acordo com a área ocupada. Neste sentido, traçou-se 6 grupos de áreas<sup>58</sup>, correspondendo: grupo1 (áreas menores que 0,3125ha); grupo2 (áreas entre 0,3125ha e 0,625ha); grupo3 (áreas entre 0,625ha e 1,25ha); grupo4 (áreas entre 1,25ha e 3,125ha); grupo5 (áreas entre 3,125ha e 6,25ha); e grupo6 (áreas maiores que 6,25ha). Os resultados desta categorização são apresentados nas Tabela 30, Tabela 31 e Tabela 32, de acordo com o número de polígonos incluídos em cada um dos 6 grupos.

---

<sup>58</sup> A faixa de variação de áreas nos grupos é de 5 *pixels* (0,3125ha), 10 *pixels* (0,625ha), 20 *pixels* (1,25ha), 50 *pixels* (3,125ha), 100 *pixels* (6,25ha).

**Tabela 30 – Distribuição do número de polígonos e respectivas áreas, segundo grupos de áreas – Classificação Visual.**

Classe	Estatísticas			Grupo de Áreas (ha)					
	Polígonos [número]	Área [ha]	Parâmetro	<0,3125	0,3125-0,6250	0,6250-1,2500	1,2500-3,1250	3,1250-6,2500	>6,25
A solo	264	369,38	Polígonos [número]	70	52	57	66	12	7
			Área do grupo [ha]	19,602	21,914	51,367	124,914	48,977	102,609
			Área média [ha]	0,280	0,421	0,901	1,893	4,081	14,658
B mata	148	9492,63	Polígonos [número]	27	12	20	29	24	36
			Área do grupo [ha]	7,422	5,414	17,648	57,352	105,063	9299,735
			Área média [ha]	0,275	0,451	0,882	1,978	4,378	258,326
C campo	176	5764,06	Polígonos [número]	11	12	30	45	25	53
			Área do grupo [ha]	2,852	5,516	26,047	90,758	110,219	5528,664
			Área média [ha]	0,259	0,460	0,868	2,017	4,409	104,314
D reforest	12	425,69	Polígonos [número]	2	1	2	2	0	5
			Área do grupo [ha]	0,591	0,594	2,305	4,461	0,000	417,738
			Área média [ha]	0,296	0,594	1,153	2,231	0,000	83,548
E cultivo	276	307,25	Polígonos [número]	83	66	53	51	19	4
			Área do grupo [ha]	24,891	29,727	46,992	99,875	72,617	33,145
			Área média [ha]	0,300	0,450	0,887	1,958	3,822	8,286
<b>Total</b>	<b>876</b>	<b>16359,0</b>		<b>55,358</b>	<b>63,165</b>	<b>144,359</b>	<b>377,360</b>	<b>336,876</b>	<b>15381,891</b>

**Tabela 31 – Distribuição do número de polígonos e respectivas áreas, segundo grupos de áreas – Classificação MaxVer.**

Classe	Estatísticas			Grupo de Áreas (ha)					
	Polígonos [número]	Área [ha]	Parâmetro	<0,3125	0,3125-0,6250	0,6250-1,2500	1,2500-3,1250	3,1250-6,2500	>6,25
A solo	278	379,50	Polígonos [número]	73	59	60	60	21	5
			Área do grupo [ha]	21,583	26,594	55,797	118,023	91,437	66,067
			Área média [ha]	0,296	0,451	0,930	1,967	4,354	13,213
B mata	252	9933,13	Polígonos [número]	100	42	32	31	18	29
			Área do grupo [ha]	29,625	22,945	29,516	83,617	98,422	9669,005
			Área média [ha]	0,296	0,546	0,922	2,697	5,468	333,414
C campo	384	5248,81	Polígonos [número]	71	44	41	100	42	86
			Área do grupo [ha]	21,242	22,453	39,727	240,919	198,852	4725,617
			Área média [ha]	0,299	0,510	0,969	2,409	4,735	54,949
D reforest	17	433,94	Polígonos [número]	4	1	2	3	1	6
			Área do grupo [ha]	1,127	0,391	1,939	7,516	5,125	417,842
			Área média [ha]	0,282	0,391	0,970	2,505	5,125	69,640
E cultivo	594	363,63	Polígonos [número]	286	130	92	75	9	2
			Área do grupo [ha]	82,047	63,880	73,977	101,609	29,070	13,045
			Área média [ha]	0,287	0,491	0,804	1,355	3,230	6,523
<b>Total</b>	<b>1525</b>	<b>16359,0</b>		<b>155,624</b>	<b>136,263</b>	<b>200,956</b>	<b>551,684</b>	<b>422,906</b>	<b>14891,576</b>

**Tabela 32 – Distribuição do número de polígonos e respectivas áreas, segundo grupos de áreas – Classificação IsoSeg.**

Classificação	Classe	Estatísticas			Grupo de Áreas (ha)					
		Polígonos [número]	Área [ha]	Parâmetro	<0,3125	0,3125-0,6250	0,6250-1,2500	1,2500-3,1250	3,1250-6,2500	>6,25
IsoSeg	A solo	132	358,38	Polígonos [número]	0,000	11	22	74	15	10
				Área do grupo [ha]	0,000	5,297	18,656	132,414	77,227	124,783
				Área média [ha]	0,000	0,482	0,848	1,789	5,148	12,478
	B mata	121	8542,44	Polígonos [número]	0,000	16	11	42	21	31
				Área do grupo [ha]	0,000	7,727	11,430	105,461	106,461	8311,357
				Área média [ha]	0,000	0,483	1,039	2,511	5,070	268,108
	C campo	154	6837,13	Polígonos [número]	0,000	12	15	54	32	41
				Área do grupo [ha]	0,000	6,500	15,516	143,227	153,570	6518,318
				Área média [ha]	0,000	0,542	1,034	2,652	4,799	158,983
	D reflorest	12	343,19	Polígonos [número]	0,000	2	0,000	4	0,000	6
				Área do grupo [ha]	0,000	0,984	0,000	10,078	0,000	332,132
				Área média [ha]	0,000	0,492	0,000	2,520	0,000	55,355
	E cultivo	111	277,88	Polígonos [número]	0,000	8	20	58	18	7
				Área do grupo [ha]	0,000	4,016	21,492	116,875	73,687	61,805
				Área média [ha]	0,000	0,502	1,075	2,015	4,094	8,829
	<b>Total</b>	<b>530</b>	<b>16359,0</b>		<b>0,000</b>	<b>24,524</b>	<b>67,094</b>	<b>508,055</b>	<b>410,945</b>	<b>15348,395</b>

Das Tabela 30, Tabela 31 e Tabela 32 observa-se, novamente, significativa variação de áreas para cada classe temática e técnica empregada. Agora, de acordo com os grupos de áreas propostos, pôde-se observar o total de área classificada, segundo a técnica utilizada. Por exemplo, para o grupo1 (<0,3125ha) a classificação visual delimitou aproximadamente 25ha para a classe E (cultivo), a classificação MaxVer discriminou mais de 80ha, enquanto a classificação IsoSeg não delimitou nenhuma área neste grupo, em função dos limiares adotados para segmentação. De uma análise geral destas 3 tabelas pode-se afirmar que a delimitação pelo MaxVer, seguida pela interpretação visual, foram as técnicas que produziram a maior fragmentação das classes temáticas. Bem mais generalista, a técnica IsoSeg delimitou as 5 classes temáticas propostas em áreas de maior dimensão, entretanto com poder discriminatório relevante e condizente com o observado na imagem e em campo.

#### 4.2.4.1 Coeficiente de Concordância Kappa

Uma vez analisados e satisfeitos os requisitos de área mínima e número de polígonos de cada classificação temática, através da análise individual de cada classificação descrita no item anterior, procedeu-se a análise conjunta fundamentada na estimativa da acurácia.

Para determinar a acurácia dos mapeamentos temáticos gerados e avaliar, desta forma, a concordância entre as classificações, foi criada uma matriz de erro a partir da *Tabulação Cruzada*, com base em 35 pontos identificados nos dois últimos levantamentos de campo.

Destes 35 pontos<sup>59</sup>, que serviram para a estimativa da exatidão da classificação visual, 5 correspondem para a data da imagem à classe A (solo), 10 à B (mata), 10 à C (campo), 5 à D (reflorestamento) e 5 à E (cultivo).

A tabulação cruzada destes pontos, em relação a interpretação visual, é apresentada no Anexo IV, que indica o número de pontos classificados correta e incorretamente para cada classe temática. Já a Tabela 33 representa a matriz de erro<sup>60</sup> da classificação visual, elaborada a partir dos resultados da tabulação cruzada (Anexo IV), e indica os valores totais da *Exatidão Global* e do *Índice Kappa* para esta técnica de classificação, bem como a exatidão do usuário e do produtor, e os erros de comissão e omissão para cada uma das 5 classes temáticas.

**Tabela 33 – Matriz de Erros da classificação Visual com 35 pontos.**

		Amostras de Campo <sup>(1)</sup>							
Classe		A	B	C	D	E	ΣLinha	Exatidão Usuário	Erros de Comissão
Classificação <sup>(2)</sup>	A	4	0	0	1	1	6	0,67	0,33
	B	0	8	1	0	0	9	0,89	0,11
	C	1	2	9	0	0	12	0,75	0,25
	D	0	0	0	4	0	4	1,00	0,00
	E	0	0	0	0	4	4	1,00	0,00
ΣColuna		5	10	10	5	5	35 <sup>(3)</sup>		
Exatidão Produtor		0,80	0,80	0,90	0,80	0,80		Exatidão Global	0,8286
Erros de Omissão		0,20	0,20	0,10	0,20	0,20		Índice Kappa	0,7778

<sup>(1)</sup> Mapa de Referência: Amostras de Campo

<sup>(2)</sup> Mapa em Avaliação: Interpretação Visual

<sup>(3)</sup> Total de Pontos Amostrados

Com o objetivo de aumentar o número de áreas de análise acrescentou-se, na tabulação cruzada, outros 12 pontos referentes ao levantamento EICOs, com a finalidade de aprimorar a avaliação dos resultados gerados. O produto da operação de tabulação cruzada envolvendo, então, os 47 pontos em relação a interpretação visual é apresentado no Anexo V. A configuração da nova matriz de erro da classificação visual é ilustrada na Tabela 34, indicando acréscimo tanto da exatidão global quanto do índice Kappa, e ainda, sugerindo a redução dos erros de omissão<sup>61</sup> para todas as classes que tiveram novas amostras (A, B, C e E). O Anexo VI apresenta, sobreposta à composição colorida, a distribuição e a localização dos 47 pontos amostrados e utilizados na estimativa do desempenho da classificação visual.

<sup>59</sup> Os 35 pontos identificados estão dispostos aleatoriamente na área de estudo, acompanhados de atributos de localização (coordenadas), registro fotográfico e classe temática correspondente.

<sup>60</sup> Também denominada pela literatura de matriz de confusão ou tabela de contingência.

<sup>61</sup> Pontos que pertencem a uma classe e não foram atribuídos a ela.

**Tabela 34 – Matriz de Erros da classificação Visual com 47 pontos.**

Classificação <sup>(2)</sup>	Classe	Amostras de Campo <sup>(1)</sup>					ΣLinha	Exatidão Usuário	Erros de Comissão
		A	B	C	D	E			
	A	10	0	0	1	1	12	0,83	0,17
	B	0	10	1	0	0	11	0,91	0,09
	C	2	2	10	0	0	14	0,71	0,29
	D	0	0	0	4	0	4	1,00	0,00
	E	0	0	0	0	6	6	1,00	0,00
	ΣColuna	12	12	11	5	7	47 <sup>(3)</sup>		
	Exatidão Produtor	0,83	0,83	0,91	0,80	0,86		Exatidão Global	0,8511
	Erros de Omissão	0,17	0,17	0,09	0,20	0,14		Índice Kappa	0,8084

(1) Mapa de Referência: Amostras de Campo + EICOs

(2) Mapa em Avaliação: Interpretação Visual

(3) Total de Pontos Amostrados

Na ausência de informações de referência de campo (verdade terrestre) mais abrangentes e tendo em vista o significativo resultado da classificação visual, a partir da matriz de erro com 47 pontos obtendo-se valores de Exatidão Global 85,11% e de Índice Kappa 80,84%, optou-se por comparar os resultados da classificação *pixel a pixel* (MaxVer) e por regiões (IsoSeg), analisando a concordância destas classificações com os resultados da classificação visual, adotada então como verdade terrestre.

Neste sentido, concluída e avaliada a acurácia do mapeamento temático produzido via classificação visual, e agora considerando então que tal classificação corresponde a verdade terrestre (mapa de referência), procedeu-se o cruzamento tabular com as demais técnicas e derivações. Os resultados da operação de tabulação cruzada da interpretação visual, em relação as classificações digitais e suas derivações, são apresentados no Anexo VII e Anexo VIII, e as matrizes de erros decorrentes são ilustradas nas Tabela 35 à Tabela 40.

**Tabela 35 – Matriz de Erros da classificação MaxVer.**

Classificação <sup>(2)</sup>	Classe	Mapa de Referência <sup>(1)</sup>					ΣLinha	Exatidão Usuário	Erros de Comissão
		A	B	C	D	E			
	A	2281875	733750	688125	32500	58750	3795000	0,60	0,40
	B	698125	86513750	10988750	218750	911875	99331250	0,87	0,13
	C	686875	6412500	45038750	11875	338125	52488125	0,86	0,14
	D	11875	316250	17500	3993750	0	4339375	0,92	0,08
	E	15000	950000	907500	0	1763750	3636250	0,49	0,51
	ΣColuna	3693750	94926250	57640625	4256875	3072500	163590000		
	Exatidão Produtor	0,62	0,91	0,78	0,94	0,57		Exatidão Global	0,8533
	Erros de Omissão	0,38	0,09	0,22	0,06	0,43		Índice Kappa	0,7248

(1) Mapa de Referência: Verdade Terrestre (Interpretação Visual)

(2) Mapa em Avaliação: Classificação Digital MaxVer

**Tabela 36 – Matriz de Erros da classificação MaxVer<sub>filtro1</sub>.**

		Mapa de Referência <sup>(1)</sup>							
Classificação <sup>(2)</sup>	Classe	A	B	C	D	E	∑Linha	Exatidão Usuário	Erros de Comissão
	A	<b>2151250</b>	611250	626875	26875	61875	3478125	0,62	0,38
	B	780625	<b>87094375</b>	11075000	199375	1056250	100205625	0,87	0,13
	C	730000	6161250	<b>45264375</b>	8750	381250	52545625	0,86	0,14
	D	19375	323750	16250	<b>4021875</b>	0	4381250	0,92	0,08
	E	12500	735625	658125	0	<b>1573125</b>	2979375	0,53	0,47
∑Coluna	3693750	94926250	57640625	4256875	3072500	<b>163590000</b>			
Exatidão Produtor	0,58	0,92	0,79	0,94	0,51		Exatidão Global	<b>0,8564</b>	
Erros de Omissão	0,42	0,08	0,21	0,06	0,49		Índice Kappa	<b>0,7291</b>	

(1) Mapa de Referência: Verdade Terrestre (Interpretação Visual)

(2) Mapa em Avaliação: Classificação Digital MaxVer\_FILTERO1

**Tabela 37 – Matriz de Erros da classificação MaxVer<sub>filtro2</sub>.**

		Mapa de Referência <sup>(1)</sup>							
Classificação <sup>(2)</sup>	Classe	A	B	C	D	E	∑Linha	Exatidão Usuário	Erros de Comissão
	A	<b>1606875</b>	508750	321875	1875	34375	2473750	0,65	0,35
	B	1471250	<b>84898125</b>	11238125	62500	654375	98324375	0,86	0,14
	C	607500	8638750	<b>45002500</b>	636250	798125	55683125	0,81	0,19
	D	8125	759375	976250	<b>3556250</b>	1015625	6315625	0,56	0,44
	E	0	121250	101875	0	<b>570000</b>	793125	0,72	0,28
∑Coluna	3693750	94926250	57640625	4256875	3072500	<b>163590000</b>			
Exatidão Produtor	0,44	0,89	0,78	0,84	0,19		Exatidão Global	<b>0,8291</b>	
Erros de Omissão	0,56	0,11	0,22	0,16	0,81		Índice Kappa	<b>0,6775</b>	

(1) Mapa de Referência: Verdade Terrestre (Interpretação Visual)

(2) Mapa em Avaliação: Classificação Digital MaxVer\_FILTERO2

**Tabela 38 – Matriz de Erros da classificação IsoSeg.**

		Mapa de Referência <sup>(1)</sup>							
Classificação <sup>(2)</sup>	Classe	A	B	C	D	E	∑Linha	Exatidão Usuário	Erros de Comissão
	A	<b>1778125</b>	496875	1187500	93125	28125	3583750	0,50	0,50
	B	731250	<b>80516875</b>	2488750	1033125	654375	85424375	0,94	0,06
	C	1170625	12871875	<b>53618125</b>	69375	641250	68371250	0,78	0,22
	D	2500	365000	3750	<b>3060625</b>	0	3431875	0,89	0,11
	E	11250	675625	342500	625	<b>1748750</b>	2778750	0,63	0,37
∑Coluna	3693750	94926250	57640625	4256875	3072500	<b>163590000</b>			
Exatidão Produtor	0,48	0,85	0,93	0,72	0,57		Exatidão Global	<b>0,8602</b>	
Erros de Omissão	0,52	0,15	0,07	0,28	0,43		Índice Kappa	<b>0,7451</b>	

(1) Mapa de Referência: Verdade Terrestre (Interpretação Visual)

(2) Mapa em Avaliação: Classificação Digital IsoSeg

**Tabela 39 – Matriz de Erros da classificação IsoSeg<sub>filtro1</sub>.**

		Mapa de Referência <sup>(1)</sup>							
Classificação <sup>(2)</sup>	Classe	A	B	C	D	E	ΣLinha	Exatidão Usuário	Erros de Comissão
	A	<b>1706250</b>	469375	1069375	90000	27500	3362500	0,51	0,49
	B	770000	<b>80398750</b>	2737500	1031250	711875	85649375	0,94	0,06
	C	1206875	13078750	<b>53505000</b>	70000	663750	68524375	0,78	0,22
	D	3750	360625	4375	<b>3065000</b>	0	3433750	0,89	0,11
	E	6875	618750	324375	625	<b>1669375</b>	2620000	0,64	0,36
ΣColuna		3693750	94926250	57640625	4256875	3072500	<b>163590000</b>		
Exatidão Produtor		0,46	0,85	0,93	0,72	0,54	Exatidão Global	<b>0,8579</b>	
Erros de Omissão		0,54	0,15	0,07	0,28	0,46	Índice Kappa	<b>0,7404</b>	

(1) Mapa de Referência: Verdade Terrestre (Interpretação Visual)

(2) Mapa em Avaliação: Classificação Digital IsoSeg\_FILTERO1

**Tabela 40 – Matriz de Erros da classificação IsoSeg<sub>filtro2</sub>.**

		Mapa de Referência <sup>(1)</sup>							
Classificação <sup>(2)</sup>	Classe	A	B	C	D	E	ΣLinha	Exatidão Usuário	Erros de Comissão
	A	<b>1406875</b>	408750	537500	54375	10000	2417500	0,58	0,42
	B	1210000	<b>79159375</b>	3986875	843750	541250	85741250	0,92	0,08
	C	1063750	14455000	<b>52448125</b>	650625	793125	69410625	0,76	0,24
	D	13125	773125	609375	<b>2708125</b>	940625	5044375	0,54	0,46
	E	0	130000	58750	0	<b>787500</b>	976250	0,81	0,19
ΣColuna		3693750	94926250	57640625	4256875	3072500	<b>163590000</b>		
Exatidão Produtor		0,38	0,83	0,91	0,64	0,26	Exatidão Global	<b>0,8345</b>	
Erros de Omissão		0,62	0,17	0,09	0,36	0,74	Índice Kappa	<b>0,6963</b>	

(1) Mapa de Referência: Verdade Terrestre (Interpretação Visual)

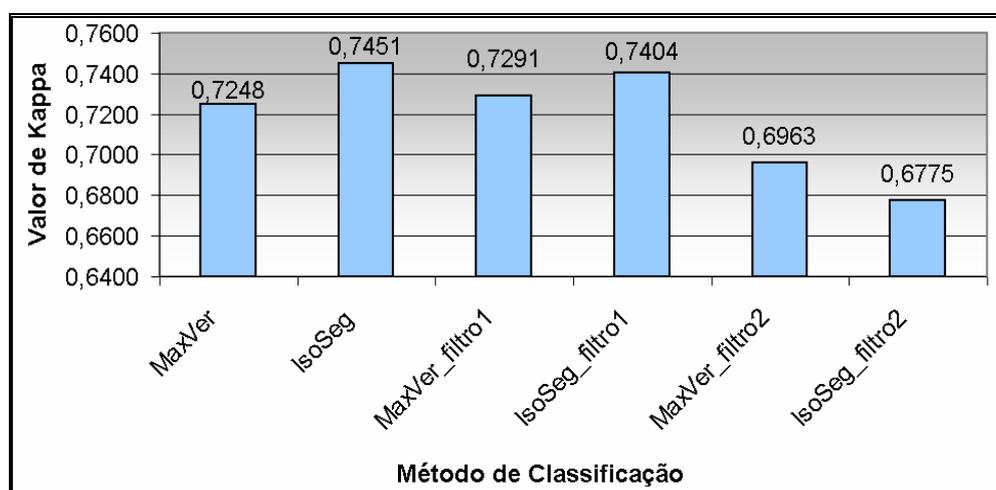
(2) Mapa em Avaliação: Classificação Digital IsoSeg\_FILTERO2

Nestas 6 matrizes de erros (Tabela 35, Tabela 36, Tabela 37, Tabela 38, Tabela 39 e Tabela 40) pôde-se observar que a área amostrada em todas as situações é coincidente (163590000m<sup>2</sup> ou seja, 16359ha) e resulta valores idênticos do “ΣColuna” para todas, uma vez que o mapa de referência foi sempre o mesmo (classificação visual). Os valores do “ΣColuna”, para cada classe, remetem as áreas (em m<sup>2</sup>) oriundas da classificação adotada como referência. Já os valores do “ΣLinha” indicam as áreas (em m<sup>2</sup>) da classificação em análise. Os totais do “ΣColuna” e “ΣLinha” coincidem em todas as situações, já que a área classificada em cada técnica é a mesma.

Nas Tabela 35 à Tabela 40, a diagonal principal, destacada em negrito, representa a exatidão geral dos dados, onde são apresentados os valores de áreas classificadas corretamente no mapa temático em análise, ou seja, remete as áreas em que houve coincidência entre os dois mapas (o de avaliação em relação o de referência).

Para cada umas destas 6 matrizes de erros, a partir do somatório da diagonal principal dividido pelo número total de unidades amostrais, obteve-se a exatidão global. A exatidão global, expressada pela razão entre os pontos corretamente classificados e o total de pontos de referência, variou para as classificações digitais, entre 82,91% (MaxVer<sub>filtro2</sub>) e 86,03% (IsoSeg).

Outro valor derivado das matrizes de erros, e calculado conforme o formulário apresentado no item 2.2.4.1., é o índice Kappa. Este índice representa inteiramente a matriz de erros e permite verificar a similaridade existente entre duas classificações, desconsiderando-se a concordância em virtude da casualidade. O coeficiente de concordância Kappa tem sido recomendado pela literatura, pois retira a parte referente à alocação puramente aleatória das classes. Este coeficiente define o grau de dependência entre duas classificações (uma de referência e outra a ser comparada) presentes na matriz de erro. Neste contexto, a Figura 51 sintetiza os valores obtidos do índice de concordância Kappa entre as classificações digitais, bem como suas derivações em relação a classificação visual, adotada aqui como sendo a de referência.



**Figura 51 – Síntese dos valores do índice Kappa obtidos para as classificações digitais quando comparadas à interpretação visual.**

A partir dos valores de Índice Kappa, sintetizados na Figura 51, foi estabelecida a relação com as tabelas empíricas de referência propostas por Landis & Koch (1977) e Fleiss (1981)<sup>62</sup> e amplamente recomendadas pela literatura na avaliação da concordância entre classificações temáticas. Ao relacionar o índice Kappa de cada técnica, com os intervalos de valores das tabelas empíricas, foi possível determinar a qualidade dos mapeamentos.

Neste sentido, de acordo com os intervalos propostos por Landis & Koch (1977), o mapeamento temático do uso e cobertura do solo para todas as classificações digitais podem ser qualificados na categoria **“muito bom”**, tendo em vista a variação entre 0,6775 (IsoSeg<sub>filtro2</sub>) e 0,7451 (IsoSeg). Considerando os intervalos estabelecidos por Fleiss (1981), todas as classificações digitais são qualificadas na categoria **“boa”**.

<sup>62</sup> As tabelas empíricas de referência de Landis & Koch (1977) e Fleiss (1981) remetem a Tabela 08 (item 2.2.4.1.).

Seguindo esta mesma abordagem, agora para a classificação visual, observa-se, de acordo com o índice Kappa obtido na Tabela 33 (Kappa=77,78%) e na Tabela 34 (Kappa=80,84%), que a classificação visual avaliada com 35 pontos é qualificada como “**muito boa**”, e a avaliada com 47 pontos como “**excelente**”, segundo os intervalos de Landis & Koch (1977). Agora, seguindo Fleiss (1981) ambas seriam classificadas na categoria “**excelente**”.

Dentre os dois métodos de classificação digital investigados, o que apresentou resultado mais relevante, em termos de **índice de concordância Kappa**, foi a classificação não supervisionada por regiões **IsoSeg**, com limiares de similaridade de níveis de cinza 15, área mínima de 6 *pixels* e limiar de aceitação de 75%. Entretanto, analisando este mesmo índice de concordância para as demais situações, pode-se afirmar que todos os resultados obtidos são bastante significativos, conferindo às técnicas utilizadas para o mapeamento temático do uso e cobertura do solo como sendo de acurácia relevante.

Considerando a exatidão obtida neste trabalho, a porcentagem das áreas mapeadas corretamente foi superior a 80%, representada em termos de Exatidão Global, para todas as técnicas e derivações testadas, qualificando assim, os resultados produzidos como sendo confiáveis.

Avaliado o **desempenho das diferentes técnicas de classificação** empregadas por intermédio da exatidão global e do índice de concordância Kappa, resta ainda a **análise específica dos resultados para cada classe temática**. Neste sentido são apresentados, para cada uma das técnicas e para cada uma das 5 classes temáticas, os valores dos erros de omissão (1 – exatidão do produtor) e de comissão (1 – exatidão do usuário).

As estimativas da exatidão do produtor, do usuário e dos erros de omissão e de comissão das classificações digitais foram extraídas das matrizes de erros apresentadas nas Tabela 35 à Tabela 40 e estão sintetizadas nas Tabela 41 à Tabela 46.

**Tabela 41 – Classificação MaxVer, valores de exatidão e erro por classe.**

Classificação MaxVer	Exatidão Global = <b>0,8533</b>		Índice Kappa = <b>0,7248</b>	
	Exatidão Produtor (%)	Erros de Omissão (%)	Exatidão Usuário (%)	Erros de Comissão (%)
A – solo	62	38	60	40
B – mata	91	9	87	13
C – campo	78	22	86	14
D – reflorest	94	6	92	8
E – cultivo	57	43	49	51

Tabela 42 – Classificação MaxVer<sub>filtro1</sub>, valores de exatidão e erro por classe.

Classificação MaxVer_filtro1	Exatidão Global = <b>0,8564</b>		Índice Kappa = <b>0,7291</b>	
	Exatidão Produtor (%)	Erros de Omissão (%)	Exatidão Usuário (%)	Erros de Comissão (%)
A – solo	58	42	62	38
B – mata	92	8	87	13
C – campo	79	21	86	14
D – reflorest	94	6	92	8
E – cultivo	51	49	53	47

Tabela 43 – Classificação MaxVer<sub>filtro2</sub>, valores de exatidão e erro por classe.

Classificação MaxVer_filtro2	Exatidão Global = <b>0,8291</b>		Índice Kappa = <b>0,6775</b>	
	Exatidão Produtor (%)	Erros de Omissão (%)	Exatidão Usuário (%)	Erros de Comissão (%)
A – solo	44	56	65	35
B – mata	89	11	86	14
C – campo	78	22	81	19
D – reflorest	84	16	56	44
E – cultivo	19	81	72	28

Tabela 44 – Classificação IsoSeg, valores de exatidão e erro por classe.

Classificação IsoSeg	Exatidão Global = <b>0,8602</b>		Índice Kappa = <b>0,7451</b>	
	Exatidão Produtor (%)	Erros de Omissão (%)	Exatidão Usuário (%)	Erros de Comissão (%)
A – solo	48	52	50	50
B – mata	85	15	94	6
C – campo	93	7	78	22
D – reflorest	72	28	89	11
E – cultivo	57	43	63	37

Tabela 45 – Classificação IsoSeg<sub>filtro1</sub>, valores de exatidão e erro por classe.

Classificação IsoSeg_filtro1	Exatidão Global = <b>0,8579</b>		Índice Kappa = <b>0,7404</b>	
	Exatidão Produtor (%)	Erros de Omissão (%)	Exatidão Usuário (%)	Erros de Comissão (%)
A – solo	46	54	51	49
B – mata	85	15	94	6
C – campo	93	7	78	22
D – reflorest	72	28	89	11
E – cultivo	54	46	64	36

**Tabela 46 – Classificação IsoSeg<sub>filtro2</sub>, valores de exatidão e erro por classe.**

Classificação IsoSeg <sub>filtro2</sub>	Exatidão Global = <b>0,8345</b>		Índice Kappa = <b>0,6963</b>	
	Exatidão Produtor (%)	Erros de Omissão (%)	Exatidão Usuário (%)	Erros de Comissão (%)
A – solo	38	62	58	42
B – mata	83	17	92	8
C – campo	91	9	76	24
D – reflorest	64	36	54	46
E – cultivo	26	74	81	19

De acordo a análise específica dos resultados **para cada classe temática** é possível identificar nas Tabela 41, Tabela 42, Tabela 43, Tabela 44, Tabela 45 e Tabela 46 que:

O melhor desempenho de exatidão do produtor (menor erro de omissão) foi obtido:

- ✓ Para a classe A (solo) pela classificação MaxVer (62%);
- ✓ Para a classe B (mata) pela classificação MaxVer<sub>filtro1</sub> (92%);
- ✓ Para a classe C (campo) pelas classificações IsoSeg e IsoSeg<sub>filtro1</sub> (93%);
- ✓ Para a classe D (reflorestamento) pelas classificações MaxVer e MaxVer<sub>filtro1</sub> (94%); e
- ✓ Para a classe E (cultivo) pelas classificações MaxVer e IsoSeg (57%).

O pior desempenho de exatidão do produtor (maior erro de omissão) foi obtido:

- ✓ Para a classe A (solo) pela classificação IsoSeg<sub>filtro2</sub> (38%);
- ✓ Para a classe B (mata) pela classificação IsoSeg<sub>filtro2</sub> (83%);
- ✓ Para a classe C (campo) pelas classificações MaxVer e MaxVer<sub>filtro2</sub> (78%);
- ✓ Para a classe D (reflorestamento) pela classificação IsoSeg<sub>filtro2</sub> (64%); e
- ✓ Para a classe E (cultivo) pela classificação MaxVer<sub>filtro2</sub> (19%).

O melhor desempenho de exatidão do usuário (menor erro de comissão) foi obtido:

- ✓ Para a classe A (solo) pela classificação MaxVer<sub>filtro2</sub> (65%);
- ✓ Para a classe B (mata) pelas classificações IsoSeg e IsoSeg<sub>filtro1</sub> (94%);
- ✓ Para a classe C (campo) pelas classificações MaxVer e MaxVer<sub>filtro1</sub> (86%); e
- ✓ Para a classe D (reflorestamento) pelas classificações MaxVer e MaxVer<sub>filtro1</sub> (92%); e
- ✓ Para a classe E (cultivo) pela classificação IsoSeg<sub>filtro2</sub> (81%);

O pior desempenho de exatidão do usuário (menor erro de comissão) foi obtido:

- ✓ Para a classe A (solo) pela classificação IsoSeg (50%);
- ✓ Para a classe B (mata) pela classificação MaxVer<sub>filtro2</sub> (86%);

- ✓ Para a classe C (campo) pela classificação IsoSeg<sub>filtro2</sub> (76%);
- ✓ Para a classe D (reflorestamento) pela classificação IsoSeg<sub>filtro2</sub> (54%); e
- ✓ Para a classe E (cultivo) pela classificação MaxVer (49%).

Portanto, evidencia-se desta análise das classes temáticas que, dentre as classificações digitais testadas, para:

- ✓ a exatidão do produtor, o algoritmo MaxVer apresentou os melhores resultados de classificação para a maioria das classes, seguido pelo MaxVer<sub>filtro1</sub> e IsoSeg. Sendo os piores resultados obtidos pelas classificações IsoSeg<sub>filtro2</sub> seguida da MaxVer<sub>filtro2</sub>.
- ✓ a exatidão do usuário, o algoritmo MaxVer e MaxVer<sub>filtro1</sub> apresentaram os melhores resultados de classificação para a maioria das classes. O pior resultado foi gerado pela classificação IsoSeg<sub>filtro2</sub>.

Das Tabela 41 à Tabela 46 denota-se ainda aspectos conclusivos e relevantes como: a classificação IsoSeg<sub>filtro2</sub> foi a técnica que delimitou o menor percentual de área para a classe E (cultivo), entretanto foi a que resultou na maior exatidão do usuário. Ou seja, dentre as 6 técnicas de classificação digital a IsoSeg<sub>filtro2</sub> é a que apresenta o maior percentual de concordância com as áreas da classe cultivo delimitadas no mapa de referência (verdade terrestre), totalizando uma coincidência de 81% entre as áreas. Por outro lado, a classificação MaxVer foi a técnica que delimitou o maior percentual de área para a classe E (cultivo), mas com o menor valor de concordância para a exatidão do usuário; ou seja, superestimou as áreas de cultivo.

Assim ressalta-se que não se pode padronizar um sistema único de classificação, pois este varia devido à realidade de cada região geográfica além do objetivo e da finalidade de aplicação do mapa temático resultante. No entanto, existem idéias básicas que podem servir como referência para o mapeamento do uso e cobertura do solo em outras regiões. O estudo de características e práticas locais, do calendário de semeadura e do ciclo (itinerário) de cultivos, das aptidões e restrições dos cultivares, além de informações dos tipos de ocorrências dos solos, do regime hídrico da região e outras características climáticas são fundamentais para a compreensão das relações entre os alvos terrestres e o reconhecimento das classes temáticas de interesse na área.

## CAPÍTULO 5 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

Após apresentar os resultados e discussões das etapas e procedimentos realizados nesta pesquisa, são descritas neste capítulo as considerações pertinentes ao trabalho. Partindo da abordagem metodológica utilizada, as recomendações deste estudo são categorizadas em dois grupos. Inicialmente sugerem-se recomendações gerais, seguidas pelos aspectos específicos quanto às técnicas de pré-processamento, realce, classificação e avaliações dos mapeamentos temáticos produzidos.

### **Recomendações Gerais**

Com base nos resultados obtidos da aplicação de técnicas de sensoriamento remoto, na área da bacia do Caeté, alguns aspectos técnicos são destacados a seguir.

A **caracterização dos Índices Físicos** foi realizada em três níveis, o primeiro deles é o nível superior, abrangendo a área de drenagem da Barragem Sul (em Ituporanga) no rio Itajaí do Sul. O segundo nível analisado envolve as bacias formadoras do primeiro nível, contemplando os rios Águas Frias, Adaga e Caeté. O terceiro e último nível de análise, subdivide a bacia do Caeté, nas duas microbacias formadoras, o rio Perito e Santo Anjo. Este levantamento justifica-se pelos esforços coletivos de pesquisa nesta área, servindo de fonte de informações para trabalhos futuros no âmbito dos projetos desenvolvidos pelo NEA/UFSC nesta região.

Observou-se, a partir desta pesquisa, que a temática ambiental envolvendo o mapeamento temático de uso e cobertura do solo proporciona vasto espaço para ações e práticas coletivas, inclusive interdisciplinares, que favorecem o reconhecimento da problemática local por parte da comunidade. A necessidade de aproximação das comunidades locais possibilita a integração de diversos sujeitos, com percepções singulares/específicas, das quais o somatório resulta o cenário atual da bacia do Caeté.

Pode-se considerar que o processo de levantamento de dados e informações exigiu um enfoque transdisciplinar, uma vez que nas saídas de campo houve diálogo entre o pesquisador e a comunidade local (agricultores, madeireiros, entre outros), estabelecendo-se assim uma relação participativa entre os atores envolvidos, onde entrelaçaram-se os conhecimentos científicos e os saberes populares. As informações obtidas em nível global, regional e local, principalmente as de caráter comunitário, foram imprescindíveis para a obtenção da qualidade do mapeamento temático do uso e cobertura do solo gerado.

Quanto aos **levantamentos de campo** para obtenção de amostras salienta-se o planejamento prévio realizado, o qual considerou, na preparação das saídas de campo, aspectos relevantes para o trabalho e o empenho: facilidade de acesso, tempo e custos financeiros; através de conversas com os mediadores locais. Os pontos amostrados foram selecionados com base na análise visual das respostas espectrais dos alvos composição 4R5G3B, dos resultados da aplicação de técnicas de realce, do estudo do calendário agrícola da região, da experiência adquirida no reconhecimento da área de estudo e durante as visitas técnicas realizadas, além das regiões delimitadas no processo de segmentação da imagem.

Observou-se também que o êxito da **classificação temática** está atrelado à época de aquisição das imagens de satélite. A data do imageamento interfere nas respostas dos alvos, principalmente agrícolas, traduzindo o comportamento espectral das classes presentes no campo em determinada data. O estudo do calendário agrícola da região é imprescindível para a compreensão da dinâmica dos cultivares, conseqüentemente facilita a interpretação da resposta espectral e acaba por definir a melhor época de obtenção de imagens de acordo com as culturas presentes em campo e os objetivos propostos.

Por outro lado, o **tipo de produto** (imagens Landsat-7 do sensor EMT<sup>+</sup>) utilizado no processamento digital de imagens apresenta restrições técnicas que limitam o registro de informações na região do visível e do infravermelho quando na presença de nuvens, pois como já visto anteriormente, estas bandas espectrais são influenciadas pela cobertura de nuvens que atenuam as respostas dos alvos ao impedir a passagem da energia refletida. Portanto, a disponibilidade de imagens, livres de cobertura de nuvens, está condicionada às condições meteorológicas e aos canais espectrais do sensor orbital do satélite. Além disso, este produto exigiu estratégia singular para avaliar a resposta radiométrica que é influenciada pela característica de relevos montanhosos na área de estudo, apresentando assim, variações de texturas nos alvos. Neste sentido foram indispensáveis as operações aritméticas entre bandas para superar o efeito de sombreamento em virtude da morfologia do terreno.

## Quanto ao Processamento Digital de Imagem

### O Pré-Processamento

Os resultados do pré-processamento determinam a qualidade dos produtos gerados, conseqüentemente, o rigor exigido na avaliação dos resultados desta etapa estão diretamente relacionados a finalidade de aplicação do mapeamento temático.

O nível de correção da imagem utilizada indica que esta possui processamento geométrico prévio, requerendo apenas uma rotação para o ajustamento ao sistema de projeção geográfica da base vetorial. Em virtude das imagens das bandas utilizadas já apresentarem relativo nível de **correção geométrica**, utilizou-se um **polinômio de 1º grau** para o ajuste das coordenadas com a base cartográfica.

Quanto ao **Registro de Imagens** observou-se que a demanda pela consistência cartográfica das informações exigiu um refinamento dos pontos de controle (pontos de registro) quando as informações da base cartográfica eram insuficientes, sendo então utilizado o sistema GPS na captura de informações de campo para o ajuste linear. Os pontos utilizados para o registro da imagem não apresentaram tendências de deslocamento e o erro quadrático médio na etapa foi considerado aceitável, já que o valor foi inferior a um *pixel*, indicando resultados significativos para a etapa de correção geométrica.

A modelagem empregando uma função polinomial de 1º grau reduziu consideravelmente as distorções geométricas iniciais da imagem e o emprego do método do *vizinho mais próximo* alterou as intensidades dos *pixels*, com a finalidade de **reamostrar** por interpolação os níveis de cinza da imagem. Além do tipo de interpolador selecionado, outros fatores que influenciaram nos resultados da operação de reamostragem foram os pontos de controle selecionados e a respectiva função de transformação geométrica para o registro (grau do polinômio).

A **Correção Radiométrica** envolveu a restauração da imagem e a correção atmosférica. Tendo em vista que a imagem utilizada não apresentava *pixels* com valores de níveis de cinza muito diferentes da sua vizinhança (pontos de ruídos), procedeu-se apenas da **filtragem** do tipo **linear** com fins de suavização dos níveis de cinza, atenuando as altas frequências da imagem.

Já a **Correção Atmosférica** considerou que o menor valor do nível de cinza de cada banda representa o efeito aditivo da atmosfera, sendo por isto empregado o método de subtração do *pixel* escuro (*Histogram Minimum Method*) utilizando a linguagem de programação LEGAL.

## Técnicas de Realce

O emprego das técnicas de realce de contraste, razão entre bandas, transformação IHS, além de composições coloridas, visaram contornar o baixo contraste espectral das bandas, contribuindo na adaptação das cores da imagem para o sistema visual humano.

A aplicação da função de **transformação de contraste linear** nas bandas resultou no aumento do contraste, ampliando o espectro das possibilidades para os 256 níveis de cinza (8 *bits*) compatíveis tanto com o número de níveis de visualização suportados pelo aplicativo Spring, quanto o da resolução radiométrica do sensor ETM<sup>+</sup>.

As **transformações multiespectrais** também contribuíram para ampliar a discriminação dos objetos da imagem. As operações aritméticas de divisão (razão) entre bandas atenuaram o efeito da topografia e a transformação IHS aumentou a resolução espacial das bandas 3, 4 e 5 através da fusão com a banda pancromática.

## O Processo de Classificação

Concluída as etapas de correções geométricas e radiométricas (pré-processamento), e aplicadas as técnicas de realce, obteve-se um produto corrigido na forma de imagem sintética que serviu para a extração das assinaturas espectrais das classes temáticas.

A análise dos dados remotamente captados foi realizada a partir de composições coloridas. Numa primeira avaliação, o reconhecimento de padrões foi percebido como atividade complexa, em virtude da extensão da área, da amplitude de variação do terreno e das declividades. Entretanto, com a sobreposição de planos de informações e a medida que os pontos amostrais registrados em campo foram sendo incorporados ao sistema de informação, a complexidade das respostas espectrais dos alvos foram sendo identificadas e decifradas.

Em relação a **classificação** via **MaxVer**, ressalta-se que esta técnica supervisionada requer o treinamento do classificador para o reconhecimento dos padrões espectrais dos alvos que definem as classes temáticas. Para isto a definição das nuvens de distribuição destas contemplou as características estatísticas das amostras de treinamento do algoritmo classificador. Os parâmetros característicos das amostras definem os resultados da classificação, implicando na necessidade de uma rigorosa seleção das **amostras de treinamento** de cada classe temática, que considerou as dimensões e formas de ocorrência de cada classe e, em específico para a classe cultivo, o calendário agrícola da região.

Já a **técnica não supervisionada** pelo algoritmo **IsoSeg** considera a informação espacial que envolve a relação entre os *pixels* e seus vizinhos (classificador por regiões), sendo que o usuário não fornece os parâmetros espectrais para definição das classes contidas na cena

e também não informa *a priori* o número nem quais classes devem ser categorizadas. Assim, o conhecimento do analista sobre as classes temáticas da área não é incorporado no processo de segmentação, entretanto o analista intervêm, no processo de classificação, ao fornecer as bandas espectrais para a segmentação e os limiares de área mínima e similaridade espectral. Destaca-se que o *processo de segmentação* exigiu relativo esforço computacional, de acordo com os limiares estabelecidos. A princípio, quanto menores foram os limiares de similaridade e área, maior é o tempo de processamento digital. A estratégia adotada de estabelecimento de grupos de pares de limiares visou minimizar as análises, entretanto investigou amplamente as possíveis combinações, deste pares de limiares rigorosos (S06A06) até pares de limiares brandos (S50A20).

Na comparação da aplicação do método MaxVer e em relação ao IsoSeg, ressalta-se a vantagem do segundo que, por considerar as regiões e não apenas o pixel, fornece informações de natureza espacial. Isto significa a agregação de uma informação pelo algoritmo IsoSeg que não foi levada em conta quando na utilização do MaxVer. O produto da classificação digital é apresentado por meio da simplificação das diferentes classes espectrais, sendo representado por um mapa de *pixels* onde ocorre a redução de um grande número de níveis de cinza das bandas espectrais em um pequeno número de classes do mapa temático final.

As **etapas críticas do processo de classificação** foram: na interpretação visual a delimitação das classes e interpretação propriamente dita; no algoritmo MaxVer, a aquisição de amostras representativas das classes temáticas para o treinamento; e na técnica IsoSeg, o mapeamento das classes (regiões) geradas a partir da classificação da imagem segmentada.

### **A Avaliação das Classificações**

A elaboração das matrizes de erros na avaliação da exatidão do mapeamento do uso e cobertura do solo, por intermédio de algoritmos de classificação digital, demonstrou ser eficiente e relevante para a análise dos resultados. Pois, a partir destas matrizes, foi possível mensurar a exatidão (do produtor e do usuário) de cada classe temática e a exatidão global da classificação. Em termos da exatidão de uma categoria de uso e cobertura do solo, observa-se que as classificações digitais são estatisticamente diferentes entre si. Da análise dos resultados produzidos, observou-se relativa concordância entre as classificações digitais e o mapa de referência (interpretação visual). Os resultados produzidos pelas imagens pós classificadas (suavizadas) apresentaram menor valor de “Kappa” e de exatidão global, sugerindo que a generalização dos dados não contribui para a melhora de desempenho das classificações digitais.

A metodologia aplicada e as técnicas adotadas resultaram numa discriminação adequada para o cultivo analisado, bem como das demais classes temáticas propostas, evidenciando a importância do conhecimento: a) da realidade do campo no momento da seleção do produto orbital; e b) de informações auxiliares que representem o contexto local da região. As classes: mata (B), campo (C) e reflorestamento (D) foram muito bem particionadas tanto pelas técnicas digitais de classificação quanto na interpretação visual. Já as classes cultivo (E) e solo (A), ao contrário, foram as que apresentam maior complexidade no mapeamento, exigindo recorrentes consultas ao material colateral sistematizado.

Frente aos resultados alcançados, enfatiza-se que a escolha pela aplicação de determinada técnica decorre da classe temática de interesse, sendo que as vantagens e desvantagens de cada algoritmo devem ser localmente avaliadas de acordo com as características da região em estudo.

Os valores obtidos de concordância entre as classificações bem como de suas derivações, reportados pelo índice Kappa, permitem qualificar todos os produtos gerados, todavia enfatiza-se que a operação de filtragem deverá sempre ser aplicada com cautela, pois apesar de suavizar o mapa temático derivado, reduz o valor da concordância Kappa ao generalizar as manchas de dimensões reduzidas.

Recomenda-se ainda, testes comparativos dos resultados obtidos com outras técnicas de classificação multiespectral “*pixel a pixel*”, como a distância mínima e método do paralelepípedo, ambas implementadas no Spring. Enfatiza-se também a necessidade de uma rigorosa avaliação da matriz de classificação das amostras antes da edição matricial (pós-classificação).

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADAMI, Marcos; PINHEIRO, Eduardo S.; MOREIRA, Maurício A. (2002). “Aplicação de diferentes algoritmos para a classificação de imagens ETM/LANDSAT-7 no mapeamento agrícola”. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. São José dos Campos: 2002. 41p.
- AGRA FILHO, Severino; VIEGAS, Oswaldo (1995). “Planos de gestão e programas de monitoramento costeiro: diretrizes de elaboração”. Ministério do Meio Ambiente. Brasília: 1995. 85p.
- AGUIAR, Ana Paula Dutra (2002). “Land Use and Cover Change – LUCC”. Apresentação, 97 slides. Extraído de <<http://www.dpi.inpe.br/cursos/tutoriais/modelagem.htm>>.
- \_\_\_\_\_(2003). “Modelagem de Mudanças de Uso e Cobertura da Terra – Mudanças Globais”. Extraído de <[http://www.dpi.inpe.br/cursos/tutoriais/modelagem/cap4\\_modelos\\_lucc.pdf](http://www.dpi.inpe.br/cursos/tutoriais/modelagem/cap4_modelos_lucc.pdf)> In: CÂMARA & MONTEIRO (2003).
- AIT BELAID, M.; EDWARDS, G.; JATON, A.; THOMSON, K. P. B. (1992). “Post-segmentation classification of images containing small agricultural fields”. *Geocarto International*, v. 3, 1992. p.53-60.
- ALMEIDA, Eliana M. de; SEIBT, César R.; VIECILI, Fábio L.; *et al.* (2002). “Relatório de Atividades do Grupo Interdisciplinar”. Área de Atuação: Município de Alfredo Wagner, SC - Período: Janeiro a Dezembro de 2001, referente ao projeto “Controle de Enchentes e Gestão Ambiental Participativa”. Florianópolis: 2002. 30p.
- ALMEIDA, Eliana Maria de (2003). “O processo histórico de uso e ocupação do solo e sua relação com a água em Alfredo Wagner (SC) – Experiência interdisciplinar de uma construção participativa local”. Dissertação (Mestrado) PPGEA - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós Graduação em Engenharia Ambiental. Florianópolis: 2003. 274p.
- ANDERSON, James R.; HARDY, Ernest E.; ROACH, John *et al.* (1979). “Sistema de classificação do uso da terra e do revestimento do solo para a utilização com dados de sensores remotos”. IBGE, Trad. Harold Strang. Rio de Janeiro: 1979. 78p.
- APLIN, P.; ATKINSON, P. M.; CURRAN, P. J. (1999). “Fine spatial resolution simulated satellite sensor imagery for land cover mapping in the United Kingdom”. *Remote Sensing of Environment*, v. 68, n. 3, 1999. p.206-216.
- AVERY, T. E.; BERLIN, G. L. (1992). “Fundamentals of Remote Sensing and Airphoto Interpretation”. Prentice Hall, 5. ed. Upper Saddle River: 1992. 472p.
- BARROS, Mariana G. M. de; LUIZ, Alfredo J. B.; EPIPHANIO, José C. N. (2001). “Segmentação multitemporal de imagens em áreas agrícolas”. *Anais do X Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, Foz do Iguaçu: 2001. 3p.
- BINS, L. S.; FONSECA, L. M. G.; ERTHAL, G. J. (1996). “Satellite imagery segmentation: a region growing approach”. *Anais do VIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, Salvador: 1996. 6p.
- BISHOP, Y. S.; FIENBERG, S. E.; HOLLAND, P. W. (1975). “Discrete multivariate analysis: theory and practice”. Cambridge, MIT Press. Massachusetts: 1975. 575p.
- BRITES, R. S.; VICENTE, P.S.; RIBEIRO, C. A. A. S. (1996). “Comparação de desempenho entre três índices de exatidão aplicados a classificação de imagens orbitais”. *Anais do VIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, Salvador: 1996. 10p.
- BRÜGGEMAN, Fernando Maciel (2001). “Recursos naturais, com potencial turístico, para o desenvolvimento local sustentável do município de Rancho Queimado no estado de Santa Catarina”. Dissertação (Mestrado) PPGEA0098 - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós Graduação em Engenharia Ambiental. Florianópolis: 2001. 180p.
- CALDEIRA, H. S. (1994). “Classificação temática de áreas litorâneas: uma contribuição metodológica”. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) INPE 5586-TDI/548 – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. São José dos Campos: 1994. 133p.

- CÂMARA, G. & MEDEIROS, J. S. (1996). "Geoprocessamento para Projetos Ambientais". Tutorial. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. São José dos Campos: 1996.
- CAMPBELL, J. B. (1996). "Introduction to remote sensing". 2ª edição. New York: The Guilford Press. 1996. 622p.
- \_\_\_\_\_(1997). "Land Use and Cover Inventory". In: Manual of Photographic Interpretation. 2ª ed. USA: ASPRS, 1997. 335 a 360p.
- CARPER, W.J.; LILLESAND, T.M.; KIEFER, R. (1990). "The use of intensity-hue-saturation transformations for merging SPOT panchromatic and multispectral image data". Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, v. 56, n. 4, p. 459-467, Abr. 1990.
- CARVALHO, Melissa (2003). "Mapeamento da sensibilidade ao impacto por óleo de um segmento da costa entre os estados do Rio Grande do Norte e Ceará utilizando imagens ETM+/Landsat 7 e geoprocessamento". Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) INPE-9876-TDI/872 – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. São José dos Campos: 2003. 253p.
- CHECCHIA, Tatiane (2005 no prelo). "Avaliação de perda de solo por erosão hídrica e estudo de emergência na bacia do rio Caeté, Alfredo Wagner – SC". Dissertação (Mestrado) PPGEA - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós Graduação em Engenharia Ambiental. Florianópolis: 2005. no prelo.
- CHEN, S. C. (1996). "Informações espectrais e texturais de vegetação da região amazônica a partir de dados do sensor TM do satélite LANDSAT". Tese (Doutorado) - Universidade de São Paulo. São Paulo: 1996. 135p.
- CHEN, S. C.; GODOY Junior, M.; HERZ, R. (1995). "Correção atmosférica através do método de subtração - aplicabilidade para analisar imagens da Região Amazônica". Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE-5622-NCT/316). São José dos Campos: 1995. 12 p.
- CHUVIECO, E. (1990). "Fundamentos de teledetección espacial". Ed. Rialp S.A. Madrid: 1990. 453p.
- \_\_\_\_\_(2000). "Fundamentos de teledetección espacial". Ed. Rialp S.A. Madrid: 2000. 568p.
- CLAWSON, M. & STEWART, S. I. (1965). "Land use information - A critical survey of us statistics including possibilities for greater uniformity". Baltimore, Md: The John Hopkins Press for Resources for the Future, Inc. 402p.
- COLWELL, J. E. (1974). "Vegetation Canopy Reflectance". Remote Sensing of Environment, v.03, n.03. 1974. p.175-183.
- COMITÊ ITAJAÍ (2004). Extraído de <[http://www.comiteitajai.org.br/bac\\_ins.htm](http://www.comiteitajai.org.br/bac_ins.htm)>
- CONGALTON, R. G., GREEN, K. (1999). "Assessing the accuracy of remotely sensed data: principles and practices". Lewis Publishers. New York: 1999. 137p.
- CORREIA, A. H. (1999). "Projeto, desenvolvimento e avaliação de classificadores estatísticos pontuais para imagens SAR polarimétricas". Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) INPE 7178-TDI/679 – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. São José dos Campos: 1999. 251p.
- CROSS, A. M.; MASON, D. C.; DURY, S. J. (1988). "Segmentation of remotely-sensed images by a split-and-merge process". International Journal of Remote Sensing, v. 9, n.8, 1988. 1329-1345p.
- CRÓSTA, A. P. (1992). "Processamento digital de imagens de sensoriamento remoto". IG/UNICAMP. Campinas: 1992. 170p.
- D'ALGE, J. C. L. (1997). "Atualização Cartográfica por Imagem de Satélite: considerações teóricas e possibilidades de implementação". Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. São José dos Campos: 1997. 12p.
- DAINELLI, P. (1990). "Photointerpretation criteria for land-resources studies". Food an Agriculture Organization of the United Nation (FAO). RSC Series 54, FAO. Roma: 1990. p.19-26.
- ENGESAT (2004). Portal da Empresa. Extraído de <<http://www.engesat.com.br>>
- EPAGRI (2002). "Atlas Climatológico do Estado de Santa Catarina". Santa Catarina. Empresa de Pesquisa Agropecuária e de Extensão Rural do Estado de Santa Catarina. Florianópolis: 2002. In: cd rom.
- FAO (1996). "Participacion Campesina para una agricultura sostenible en países de America Latina". Roma: 1993. 60p.

- FATORGIS (2002). Extraído de <<http://fatorgis.com.br>>.
- FIBGE (1997). “Manual técnico de uso da terra”. Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (FIBGE). Série Manuais Técnicos em Geociências. n. 7. Rio de Janeiro: 1997. 105p.
- \_\_\_\_\_(2002). Censo Demográfico 2000. Extraído de: <<http://www1.ibge.gov.br/censo/default.php>>.
- \_\_\_\_\_(2003). “LSPA: Levantamento Sistemático da Produção Agrícola”. Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (FIBGE). Extraído de <<http://www.lspa.ibge.gov.br>>.
- \_\_\_\_\_(2004). “SIDRA: Sistema IBGE De Recuperação Automática”. Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (FIBGE). Extraído de <<http://www.sidra.ibge.gov.br>>.
- FLEISS, J. L. (1981). “Statistical methods for rates and proportions”. Ed. John Wiley & Sons. New York: 1981. 321p.
- FLORENZANO, T. G. (1993). “Unidades Geomorfológicas da região sudeste (SP) identificadas por imagens de satélites”. São Paulo: FFLCH/USP, 1993.
- FONSECA, Leila M. G. (2000). “Processamento digital de imagens”. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. São José dos Campos: 2000. 119p.
- GABOARDI, Clovis (2002). “Utilização de imagem de coerência SAR para classificação do uso da terra: Floresta Nacional do Tapajós”. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) INPE-9612-TDI/842 – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. São José dos Campos: 2002. 137p.
- GARMIN (1999). “GARMIN eTrex Summit - Navegador Pessoal”. Manual do Usuário e Guia de Referência. GARMIN International, Olathe: 1999. 64p.
- GIANNOTTI, Mariana Abrantes (2001). “Geotecnologias na análise de impactos sócio-ambientais: o caso da queima de cana-de-açúcar na região de Piracicaba”. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) INPE-9821-TDI/864 – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. São José dos Campos: 2001. 147p.
- GIBSON, P. J.; POWER, C. H. (2000). “Introductory remote sensing: digital image processing and applications”. Routledge Taylor & Francis Group. New York: 2000. 288p.
- GÜRTLER, Salete (2003). “Estimativa de área agrícola a partir de sensoriamento remoto e banco de dados de pixels amostrais”. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) INPE-9774-TDI/858 – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. São José dos Campos: 2003. 177p.
- HERMANN, M. L. P. (2001). “Levantamento dos desastres naturais causados pelas adversidades climáticas no estado de Santa Catarina”. Florianópolis: IOESC, 2001. 89p.
- ICEPA (2003). “Síntese anual da agricultura de Santa Catarina, 2002-2003” Instituto de Planejamento e Economia Agrícola de Santa Catarina (Instituto Cepa). Florianópolis: 2003.
- \_\_\_\_\_(2004). Instituto de Planejamento e Economia Agrícola de Santa Catarina. Extraído de <<http://www.icepa.com.br>>.
- INPE/SELPER (2002). Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais/Sociedade de Especialistas Latinoamericanos em Sensoriamento Remoto (INPE/SELPER) Cadernos didáticos. Extraído de: <<http://www.ltid.inpe.br/selper/image/inicio.html>>.
- INPE/ATUS (2003). Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais/Setor de Atendimento ao Usuário (INPE/ATUS). Extraído de: <<http://www.ltid.inpe.br/html>>.
- INPE/DPI (2003a). Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais/Divisão de Processamento de Imagens (INPE/DPI). SPRING: Tutorial de Geoprocessamento. Extraído de: <<http://www.dpi.inpe.br/spring/tutorial/index.html>>.
- \_\_\_\_\_(2003b). Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais/Divisão de Processamento de Imagens (INPE/DPI). Processamento digital de imagens e suas técnicas. Extraído de: <<http://www.dpi.inpe.br/spring/usuario/index.htm>>.
- JENSEN, J. R.; COWEN, D. J. (1999). “Remote sensing of urban; suburban infrastructure and socio-economic attributes”. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, v. 65, n. 5. May, 1999. p.611-622.
- JOHNSON, R. A.; WICHERN, D. W. (1998). “Applied Multivariate Statistical Analysis”. Prentice-Hall, 4th edition, 1998.
- JOLY, F. (1990). “A cartografia”. Papirus. Campinas: 1990. 136p.

- KLEIN, Roberto Miguel (1978). “Mapa fitogeográfico do Estado de Santa Catarina”. SUDESUL/FATMA, Itajaí: 1978. 24p.
- KUERTEN, Roberto Maykot (1998). “Produção de cartas de uso e cobertura da terra a partir de dados obtidos por sensores remotos, área teste: Parque Municipal da Lagoa do Peri”. Dissertação (Mestrado) PECV0075 - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Florianópolis: 1998. 95p.
- LACRUZ, Maria Silvia Pardi (1996). “Sensoriamento remoto e sistemas de informação geográfica como subsídio para levantamentos fisionômico-estruturais em floresta tropical úmida – estudo de caso: Estação Científica Ferreira Penna, PA”. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) INPE-6824-TDI/644 – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. São José dos Campos: 1996. 114p.
- LANDIS, J. R.; KOCH, C. H. (1977). “The measurement of observer agreement for categorical data”. *Biometrics*, v. 33, n. 3, Mar. 1977. p.159-174.
- LANDSAT (2004). Extraído de <<http://www.landsat.com>>.
- LAPOLLI, Édis Mafrá (1994). “Processamento de imagens digitais : uma abordagem utilizando conjuntos difusos”. Tese (Doutorado) PEPS0327 – Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção. Florianópolis: 1994. 206p.
- LILLESAND, T. M.; KIEFER, R.W. (1994). “Remote Sensing and Image Interpretation”. Ed. John Wiley & Sons, 3ed. New York: 1994. 750p.
- LOCH, Ruth Emília Nogueira (2000). “Estruturação de dados geográficos para a gestão de áreas degradadas pela mineração”. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Paraná, Doutorado em Ciências Florestais, Setor Ciências Agrárias. Curitiba: 2000. 202p.
- LORENA, Rodrigo Borrego (2001). “Evolução do uso da terra em porção da Amazônia Ocidental (Acre), com uso de técnicas de detecção de mudanças”. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) INPE-9650-TDI/846 – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. São José dos Campos: 2001. 116p.
- MA, Z.; REDMOND, R. L. (1995). “Tau coefficients for accuracy assessment of classification of remote sensing data”. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, v. 61, n. 4. Apr. 1995. p.435-439.
- MASCARO, Sofia A.; FERREIRA, Marcos C. (2003). “Análise comparativa entre algoritmos de classificação digital de imagem com base na exatidão do mapeamento do uso e cobertura do solo: um exemplo na área de influência do reservatório de Jurumirim-SP”. Anais do XI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Belo Horizonte: 2003. 8p.
- MASSON, Ivanete (2004). “A Gestão Ambiental Participativa: possibilidades e limites de um processo de múltiplas relações”. Dissertação (Mestrado) PPGEA0189 - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós Graduação em Engenharia Ambiental. Florianópolis: 2004. 165p.
- MATA ATLÂNTICA (2003). “Atlas da evolução dos remanescentes florestais e ecossistemas associados”. Fundação SOS Mata Atlântica. Extraído de: <<http://www.sosmatatlantica.org.br/atlas>>.
- MATHER, P. M. (1987). “Computer processing of remotely-sensed images: an introduction”. Ed. John Wiley & Sons, 1 ed. Great Britain: 1987. 352p.
- MATHER, P. M. (1999). “Computer processing of remotely-sensed images: an introduction”. Ed. John Wiley & Sons, 2 ed. Great Britain: 1999. 292p.
- MELO, Danilo Heitor Caíres Tinoco Bisneto (2002). “Uso de dados Ikonos II na análise urbana: testes operacionais na Zona Leste de SP”. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) INPE-9865-TDI/870 – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. São José dos Campos: 2002. 146p.
- MENDONÇA, Cleciane Dias (2005 no prelo). “A Construção Participativa dos Caminhos das Águas em Alfredo Wagner/SC: Uma contribuição à gestão dos recursos hídricos e promoção do turismo sustentável”. Dissertação (Mestrado) PPGEA - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós Graduação em Engenharia Ambiental. Florianópolis: 2005. no prelo.

- MONEGAT, Claudino (1994). "Sustentabilidade do sistema de produção da cebola, sob cultivo com a prática do pousio/queima, na microbacia hidrográfica do rio Caeté, município de Alfredo Wagner-SC". Especialização em Interações Edafohidrológicas em Microbacias Hidrográficas, Universidade Federal de Santa Catarina, Centro de Ciências Agrárias, Departamento de Engenharia Rural. Florianópolis: 1994. 39p.
- MOREIRA, Maurício A.; SOUZA, Iris de M. (2001). "Análise de resultados de segmentação por crescimento de regiões em diferentes técnicas de processamento digital de dados do Landsat/TM para mapeamento de áreas cafeeiras". Anais do X Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Foz do Iguaçu: 2001. 4p.
- MOREIRA, Lucimar; ASSAD, Eduardo D. (2003). "Segmentação e classificação supervisionada para identificar pastagens degradadas". Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. São José dos Campos: 2003. 6p.
- MOREIRA, Maurício Alves (2003). "Fundamentos do sensoriamento remoto e metodologias de aplicação". Universidade Federal de Viçosa. Editora UFV. 2ª ed. Viçosa: 2003. 307p.
- MOURA, Valdir (2000). "Imagens multitemporais TM/Landsat-5 da época de pré-plantio na estimativa de áreas destinadas a culturas de verão". Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) INPE-7527-TDI/734 – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. São José dos Campos: 2000. 122p.
- NEA (2004). Núcleo de Estudos da Água. "Banco de Imagens – fotografias". Acervo em meio digital. IN: cd rom. Florianópolis: 2004.
- NISHIDA, Waleska (1998). "Uma rede neural artificial para classificação de imagens multiespectrais de sensoriamento remoto". Dissertação (Mestrado) PEPS0688 - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção. Florianópolis: 1998. 90p.
- NOVO, E. M. L. M. (1989). "Sensoriamento Remoto: princípios e aplicações". 1. ed. Edgard Blücher. São Paulo: 1989. 308p.
- OLIVEIRA, J. L. R.; POMPÊO, C. A., VIECILI, F. L. *et al.* (2004). "Qualidade da água e educação ambiental na região da Lagoa do Peri (Florianópolis, SC)". Anais do XI Simpósio Internacional de Iniciação Científica da Universidade de São Paulo. São Carlos, São Paulo: 2003. 8p.
- ORELLANA, Margarida Maria Penteado (1985). "Metodologia integrada no estudo do meio ambiente". Geografia, v.10, n.20. Rio Claro: 1985. p.125-148
- PANICHI, J. de A. V.; BACIC, I. L. Z.; LAUS NETO, J. A.; CHANIN, Y. M. A.; VIEIRA, H. J. (1994). "Metodologia para o inventário das terras em microbacias hidrográficas". Santa Catarina. Empresa de Pesquisa Agropecuária e de Extensão Rural do Estado de Santa Catarina. Florianópolis: 1994. 50p.
- PEDREIRA, Bernadete C.C.G. & SANTOS, Rozely Ferreira dos (1999). "Avaliação das escalas de 1:25.000 e 1:100.000 em mapeamentos orientados a planejamentos ambientais". Caderno de Informações Georreferenciadas, Vol. 1, Número 3, Artigo 1, 6p.
- POMPÊO, César A. (2004). "Controle de Enchentes e Gestão Ambiental Participativa em Alfredo Wagner, SC". CNPq: Relatório de Pesquisa. Período 2002-2003. Florianópolis: 2004. 28p.
- POMPÊO, César A.; PHILIPPI, Luiz S.; KOBAYAMA, Masato *et al.* (2003). "Planejamento participativo de recursos hídricos na região das nascentes do rio Itajaí do Sul". FINEP: Relatório de Pesquisa. Período: janeiro a setembro de 2003. Florianópolis: 2003. 28p.
- RAMOS, Jorge Anderson Paiva (1999). "Uso de sistemas de informações geográficas (SIG) e banco de dados para análise de parâmetros meteorológicos e oceanográficos". Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) INPE-9398-TDI/823 – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. São José dos Campos: 1999. 142p.
- RANGEL, Maurício Eduardo Salgado (2000). "Contribuição dos dados integrados dos sistemas sensores TM/Landsat-5 e ERS-1/SAR para o estudo de uso e cobertura da terra no nordeste da Ilha do Maranhão". Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) INPE-10032-TDI/883 – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. São José dos Campos: 2000. 112p.

- RANIERI, S. B. L. (1996). “Avaliação de métodos e escalas de trabalho para determinação de risco de erosão em bacia hidrográfica utilizando sistemas de informação geográficas (SIG)”. Dissertação (Mestrado) Ciências da Engenharia Ambiental, Escola de Engenharia, USP. São Carlos: 1996.
- RICHARDS, J. A. (1986). “Remote sensing digital image analysis: an introduction”. 1 ed. Springer-Verlag. Berlin: 1986. 281p.
- \_\_\_\_\_(1995). “Remote sensing digital image analysis: an introduction”. 3 ed. Springer-Verlag. Berlin: 1995. 340p.
- ROSA, R. (1990). “A atualização de imagens TM/Landsat em levantamento de uso do solo”. Anais do VI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, v. 2, p. 419-425. Manaus: 1990.
- ROSOT, Nelson Carlos (2001). “Integração de imagens de sensores de microondas e ópticos para fins de mapeamento e classificação de reflorestamentos no sul do Brasil”. Tese (Doutorado) PEP1778 - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção. Florianópolis: 2001. 190p.
- SACHET, Zeferino Pedro *et al.* (1994). “Levantamento Edafoclimático da Microbacia do Rio Caeté, Município de Alfredo Wagner”. Inventário das Terras em Microbacias Hidrográficas. Projeto Microbacias/BIRD. Fundação de Amparo à Pesquisa e Extensão Universitária, Documento técnico 20. Florianópolis: 1994. 25p.
- SALGADO, Gabriela (2002). “Integração do sensoriamento remoto e sistema de informações geográficas para análise temporal do uso da terra: Parque Municipal da Lagoa do Peri, Florianópolis - SC”. Dissertação (Mestrado) PECV0209 - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Florianópolis: 2002. 102p.
- SANTA CATARINA (1986). “Atlas do Estado de Santa Catarina”. Gabinete de Planejamento e Coordenação Geral. Rio de Janeiro, RJ. 173p.
- \_\_\_\_\_(1997). “Bacias Hidrográficas de Santa Catarina: diagnóstico geral”. Santa Catarina. Secretaria de Estado do Desenvolvimento Urbano e Meio Ambiente (SDM). Florianópolis: 1997. 163p.
- \_\_\_\_\_(1999). “Zoneamento ecológico-econômico - Vale do Itajaí”. Santa Catarina. Secretaria de Estado do Desenvolvimento Urbano e Meio Ambiente (SDM). Florianópolis: 1999. 170p.
- \_\_\_\_\_(2000a). “Inventário das terras da sub-bacia hidrográfica do rio Coruja / Bonito”. Empresa de Pesquisa Agropecuária e de Extensão Rural do Estado de Santa Catarina. Centro Integrado de Informações de Recursos Ambientais. Florianópolis: 2000. 112p.
- \_\_\_\_\_(2000b). “Mapa das Regiões Hidrográficas do Estado de Santa Catarina”. Santa Catarina. Secretaria de Estado do Desenvolvimento Urbano e Meio Ambiente. Secretaria de Estado do Desenvolvimento Rural e da Agricultura. Arquivo Digital. Escala nominal 1:500.000. Florianópolis: 2000.
- SANTOS, Janaina Sant'Ana Maia (2002). “Análise da paisagem de um corredor ecológico na Serra da Mantiqueira”. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) INPE-9553-TDI/829 – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. São José dos Campos: 2002. 174p.
- SANTOS, Rosângela L.; OHATA, Arlete T.; QUINTANILHA, José A. (2003). “A análise bayesiana na classificação supervisionada de imagens: aplicação na determinação de classes de uso do solo (Mogi das Cruzes – SP)”. Anais do XI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Belo Horizonte: 2003. 4p.
- SCHMITZ, Jucineide T. M. (2003). “Os olhos que olham a educação: entrecruzando saberes interdisciplinares e práticas pedagógicas”. Dissertação (Mestrado) PPGEA - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós Graduação em Engenharia Ambiental. Florianópolis: 2003. 155p.
- SCHOWENGERDT, R. A. (1997). “Remote Sensing: models and methods for image processing”. Academic Press. San Diego: 1997. 522p.
- SEIBT, César Rodolfo (2002). “As Práticas Rurais, Água e O Processo Participativo no Município de Alfredo Wagner – SC”. Dissertação (Mestrado) PPGEA0126 - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós Graduação em Engenharia Ambiental. Florianópolis: 2002. 216p.

- SHIMABUKURO, Y. E.; SMITH, J. A. (1991). "The least-squares mixing model to generate fraction images from remote sensing multispectral data". *IEEE Transactions in Geosciences and Remote Sensing*, v. 29, n. 01, 1991. p.16-20.
- SHIMABUKURO, Y. E.; YI, J. L. R.; DUARTE, V. (1997). "Segmentação e classificação da imagem sombra do modelo de mistura para mapear desflorestamento na Amazônia". Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. São José dos Campos: 1997. 16p.
- SHIMABUKURO, Y. E.; DUARTE, V.; MELLO, E. M. K.; MOREIRA, J. C. (2000). "Apresentação da metodologia de criação do PRODES digital". (INPE-7520-PUD/41) Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. São José dos Campos: 2000. 36p.
- SLATER, P. N. (1980). "Remote Sensing – optics and optical systems". Addison-Wesley Publishing Company. Londres: 1980. 570p.
- SMITS, P. C.; DELLEPIANE, S. G.; SCHOWENGERDT, R. A. (1999). "Quality assessment of image classification algorithms for land-cover mapping: a review and a proposal for a cost-based approach". *International Journal of Remote Sensing*, v. 20, n. 8. Aug. 1999. p.1461-1486.
- SOUZA, João Artur de (1999). "Reconhecimento de padrões usando indexação recursiva". Tese (Doutorado) PEPS0906 - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção. Florianópolis: 1999. 78p.
- STAR, J.; ESTES, J. (1990). "Geographic Information Systems: an introduction". Prentice-Hall Inc. New Jersey: 1990. 303p.
- STEFFEN, Carlos Alberto (2000). "Introdução ao Sensoriamento Remoto". Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Divisão de Sensoriamento Remoto. Projeto Educa SeRe III. Extraído de: [www.inpe.br/unidades/cep/atividadescep/educasere/index.htm](http://www.inpe.br/unidades/cep/atividadescep/educasere/index.htm)
- STORY, M.; CONGALTON, R.G. (1986). "Accuracy assessment: a user's perspective". *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, v.52, n.3. Mar. 1986. p.397-399.
- VERGARA, Oscar R.; CINTRA, Jorge P.; D'ALGE Júlio C. L. (2001). "Avaliação da exatidão cartográfica de documentos atualizados com imagens orbitais e sistemas de informação geográfica". *Anais do XX CONGRESSO BRASILEIRO DE CARTOGRAFIA*. Sociedade Brasileira de Cartografia. Porto Alegre: 2001.
- VERONA, Jane Delane (2002). "Classificação e monitoramento fenológico foliar da cobertura vegetal na região da Floresta Nacional do Tapajós - Pará, utilizando dados multitemporais do sensor Thematic Mapper (TM) do Landsat". Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) INPE-9556-TDI/832 – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. São José dos Campos: 2002. 159p.
- VIECILI, Fábio Luis (2002). "Cartografia digital para gestão ambiental – Município de Alfredo Wagner, SC". Trabalho de Conclusão do Curso (Graduação) em Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Departamento de Engenharia Civil. Florianópolis: 2002. 134p.
- VIECILI, F. L.; RUDORFF, C.; FERREIRA, C. M.; *et al.* (2002). "Subsídios para o Plano Diretor de Drenagem Urbana do Campus Universitário – Levantamento e geração de dados e informações". *Anais da II Semana de Ensino, Pesquisa e Extensão da UFSC*. Editora da Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis: 2002.
- VIECILI, F. L.; POMPÊO, C. A. (2001). "Elaboração de Bases Cartográficas em Meio Digital para o Manejo de Áreas de Proteção Ambiental". *Anais do III Encontro de las Aguas, Agua, Vida y Desarrollo*, Instituto Interamericano de Cooperação para a Agricultura (IICA). Chile: 2001. 8p.
- \_\_\_\_\_(2003). "A Cartografia Digital no Município de Alfredo Wagner, SC". *III Semana de Ensino, Pesquisa e Extensão da UFSC*. Editora da Universidade Federal de Santa Catarina, v.3. Florianópolis: 2003.
- \_\_\_\_\_(2004a). "Conversão e estruturação da Base Cartográfica em Meio Digital – Município de Alfredo Wagner, SC". *Anais do VI Congresso Brasileiro de Cadastro Técnico Multifinalitário*. Florianópolis: 2004. 6p.
- \_\_\_\_\_(2004b). "Levantamentos Topográficos no Estado de Santa Catarina: A Disponibilidade de Bases Cartográficas". *Anais do VI Congresso Brasileiro de Cadastro Técnico Multifinalitário*. Florianópolis: 2004. 5p.

- VIEIRA, Fabíola Candido Silva (2004). “Evolução temporal do uso e ocupação do solo para os anos de 1994 e 2002 no município de Vitória, ES, utilizando imagens orbitais do satélite Landsat TM”. Bacharelado em Geografia, Universidade Federal do Espírito Santo, Departamento de Geografia. Vitória: 2004. 58p.
- VIEIRA, P. R. (1996). “Desenvolvimento de classificadores de máxima verossimilhança e ICM para imagens SAR”. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) INPE 6124-TDI/585 – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. São José dos Campos: 1996. 251p.
- WAGNER, Altair (2002). “Alfredo Wagner: terra, água e índios”. Editora Do Autor, Florianópolis: 2002.
- WEGNER, Patrícia Z. (2000). “Caracterização dos Recursos Naturais e Uso do Solo da Área de Proteção Ambiental da Represa do Alto Rio Preto, Rio Negrinho – SC”. Dissertação (Mestrado) PPGEA0077 - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós Graduação em Engenharia Ambiental. Florianópolis: 2004. 160p.

**ANEXO I**  
**Rotina de cálculo em LEGAL**  
**Correção dos Efeitos Atmosféricos**

//Correção dos Efeitos Atmosféricos

{

Imagem ETMb3f ("ETM");

Imagem ETMb3fcatm ("ETM");

ETMb3f = Recuperare (Nome="ETMb3f");

ETMb3fcatm = Novo (Nome = "ETMb3fcatm", ResX = 25, ResY = 25);

ETMb3fcatm = (ETMb3f - 15);

}

{

Imagem ETMb4fc ("ETM");

Imagem ETMb4fccatm ("ETM");

ETMb4fc = Recuperare (Nome="ETMb4fc");

ETMb4fccatm = Novo (Nome = "ETMb4fccatm", ResX = 25, ResY = 25);

ETMb4fccatm = (ETMb4fc - 9);

}

{

Imagem ETMb5f ("ETM");

Imagem ETMb5fcatm ("ETM");

ETMb5f = Recuperare (Nome="ETMb5f");

ETMb5fcatm = Novo (Nome = "ETMb5fcatm", ResX = 25, ResY = 25);

ETMb5fcatm = (ETMb5f - 4);

}

**ANEXO II**  
**Rotina de cálculo em LEGAL**  
**Atenuação do Efeito de Topográfico**

//Atenuação do Efeito de Topográfico (Razão entre Bandas)

```
{  
Imagem ETM7b3f, ETM7b4f ("ETM7");  
Imagem ETM7RZb43 ("ETM7");  
ETM7b3f = Recuperare (Nome="ETM7b3f");  
ETM7b4f = Recuperare (Nome="ETM7b4f");  
ETM7RZb43 = Novo (Nome = "ETM7RZb43", ResX = 25, ResY = 25);  
ETM7RZb43 = (40 + 25 * (ETM7b4f)/(ETM7b3f));  
}  
  
{  
Imagem ETM7b4f, ETM7b5f ("ETM7");  
Imagem ETM7RZb45 ("ETM7");  
ETM7b4f = Recuperare (Nome="ETM7b4f");  
ETM7b5f = Recuperare (Nome="ETM7b5f");  
ETM7RZb45 = Novo (Nome = "ETM7RZb45", ResX = 25, ResY = 25);  
ETM7RZb45 = (25 + 40 * (ETM7b4f)/(ETM7b5f));  
}  
  
{  
Imagem ETM7b4f, ETM7b5f ("ETM7");  
Imagem ETM7RZb54 ("ETM7");  
ETM7b4f = Recuperare (Nome="ETM7b4f");  
ETM7b5f = Recuperare (Nome="ETM7b5f");  
ETM7RZb54 = Novo (Nome = "ETM7RZb54", ResX = 25, ResY = 25);  
ETM7RZb54 = (25 + 40 * (ETM7b5f)/(ETM7b4f));  
}
```

### ANEXO III

#### Limiar de Similaridade (S) e de Área Mínima (A)

#### Classes Geradas na Segmentação

	IsoSeg99,9	IsoSeg99	IsoSeg95	IsoSeg90	IsoSeg75		IsoSeg99,9	IsoSeg99	IsoSeg95	IsoSeg90	IsoSeg75
S06A06	27	39	48	51	53	S12A06	30	30	41	42	43
S06A08	29	41	51	53	54	S12A08	29	29	42	44	37
S06A10	37	39	45	52	54	S12A10	28	25	34	38	36
S06A12	27	30	42	53	54	S12A12	24	28	33	36	36
S06A15	29	32	50	53	54	S12A15	28	29	29	32	39
S06A20	18	21	37	42	48	S12A20	19	21	20	28	41

	IsoSeg99,9	IsoSeg99	IsoSeg95	IsoSeg90	IsoSeg75		IsoSeg99,9	IsoSeg99	IsoSeg95	IsoSeg90	IsoSeg75
S08A06	35	36	40	40	48	S15A06	24	27	24	32	35
S08A08	29	36	44	37	50	S15A08	22	29	32	34	37
S08A10	30	34	38	54	48	S15A10	21	25	32	34	40
S08A12	31	27	37	54	40	S15A12	22	24	29	38	40
S08A15	22	29	39	54	50	S15A15	21	26	31	31	36
S08A20	20	19	29	45	47	S15A20	16	19	24	27	34

	IsoSeg99,9	IsoSeg99	IsoSeg95	IsoSeg90	IsoSeg75		IsoSeg99,9	IsoSeg99	IsoSeg95	IsoSeg90	IsoSeg75
S10A06	30	32	41	36	48	S20A06	26	32	54	53	31
S10A08	31	34	43	39	50	S20A08	21	30	54	54	34
S10A10	31	37	36	34	48	S20A10	21	30	28	34	31
S10A12	25	29	37	38	44	S20A12	19	30	28	31	27
S10A15	19	32	37	34	42	S20A15	17	29	34	32	28
S10A20	25	27	34	42	51	S20A20	17	29	27	24	28

	IsoSeg99,9	IsoSeg99	IsoSeg95	IsoSeg90	IsoSeg75
S30A06	21	27	54	53	46
S30A08	20	24	54	53	35
S30A10	20	23	32	35	36
S30A12	19	26	31	33	40
S30A15	30	23	32	31	33
S30A20	14	21	53	49	48

	IsoSeg99,9	IsoSeg99	IsoSeg95	IsoSeg90	IsoSeg75
S40A06	17	19	54	53	33
S40A08	17	19	54	53	29
S40A10	11	21	26	36	35
S40A12	12	20	25	31	30
S40A15	14	19	23	36	32
S40A20	14	17	24	27	37

	IsoSeg99,9	IsoSeg99	IsoSeg95	IsoSeg90	IsoSeg75
S50A06	11	18	34	46	41
S50A08	12	26	31	46	47
S50A10	12	23	34	38	35
S50A12	12	26	26	43	36
S50A15	14	18	25	39	36
S50A20	12	18	23	39	47

## ANEXO IV

### Tabulação Cruzada

#### 35 Pontos X Classificação Visual

	(1) * (2)	(1) - Ptos	(2) - Visual	Pixel
<b>solo</b>	<b>solo * solo</b>	<b>solo</b>	<b>solo</b>	<b>4</b>
	solo * mata	solo	mata	0
	solo * campo	solo	campo	<b>1</b>
	solo * reflo	solo	reflo	0
	solo * cultivo	solo	cultivo	0
<b>mata</b>	mata * solo	mata	solo	0
	<b>mata * mata</b>	<b>mata</b>	<b>mata</b>	<b>8</b>
	mata * campo	mata	campo	<b>2</b>
	mata * reflo	mata	reflo	0
	mata * cultivo	mata	cultivo	0
<b>campo</b>	campo * solo	campo	solo	0
	campo * mata	campo	mata	<b>1</b>
	<b>campo * campo</b>	<b>campo</b>	<b>campo</b>	<b>9</b>
	campo * reflo	campo	reflo	0
	campo * cultivo	campo	cultivo	0
<b>reflo</b>	reflo * solo	reflo	solo	<b>1</b>
	reflo * mata	reflo	mata	0
	reflo * campo	reflo	campo	0
	<b>reflo * reflo</b>	<b>reflo</b>	<b>reflo</b>	<b>4</b>
	reflo * cultivo	reflo	cultivo	0
<b>cultivo</b>	cultivo * solo	cultivo	solo	<b>1</b>
	cultivo * mata	cultivo	mata	0
	cultivo * campo	cultivo	campo	0
	cultivo * reflo	cultivo	reflo	0
	<b>cultivo * cultivo</b>	<b>cultivo</b>	<b>cultivo</b>	<b>4</b>

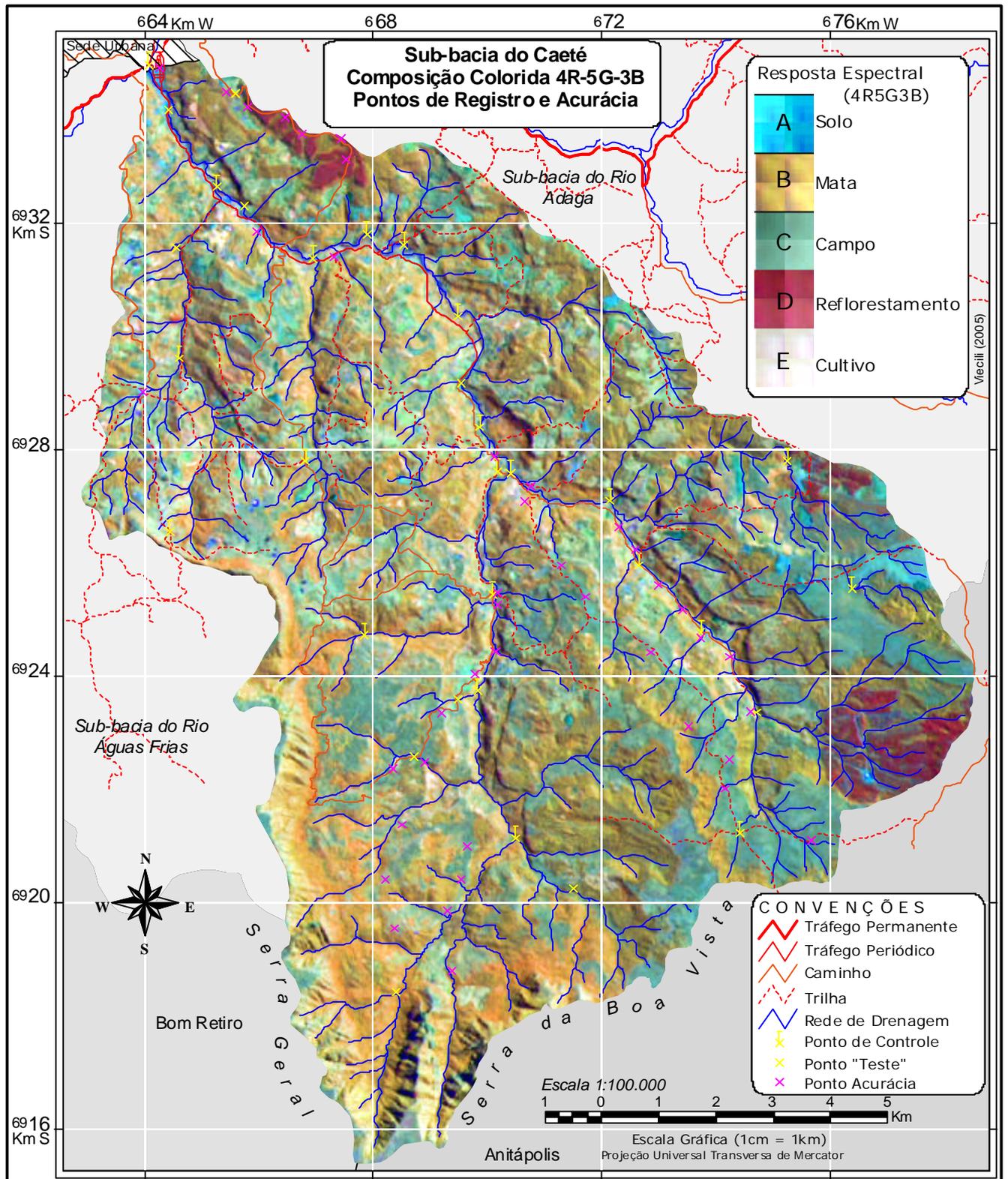
## ANEXO V

### Tabulação Cruzada

#### 47 Pontos X Classificação Visual

	(1) * (2)	(1) - PtosEICOs	(2) - Visual	Pixel
<b>solo</b>	<b>solo * solo</b>	<b>solo</b>	<b>solo</b>	<b>10</b>
	solo * mata	solo	mata	0
	solo * campo	solo	campo	<b>2</b>
	solo * reflo	solo	reflo	0
	solo * cultivo	solo	cultivo	0
<b>mata</b>	mata * solo	mata	solo	0
	<b>mata * mata</b>	<b>mata</b>	<b>mata</b>	<b>10</b>
	mata * campo	mata	campo	<b>2</b>
	mata * reflo	mata	reflo	0
	mata * cultivo	mata	cultivo	0
<b>campo</b>	campo * solo	campo	solo	0
	campo * mata	campo	mata	<b>1</b>
	<b>campo * campo</b>	<b>campo</b>	<b>campo</b>	<b>10</b>
	campo * reflo	campo	reflo	0
	campo * cultivo	campo	cultivo	0
<b>reflo</b>	reflo * solo	reflo	solo	<b>1</b>
	reflo * mata	reflo	mata	0
	reflo * campo	reflo	campo	0
	<b>reflo * reflo</b>	<b>reflo</b>	<b>reflo</b>	<b>4</b>
	reflo * cultivo	reflo	cultivo	0
<b>cultivo</b>	cultivo * solo	cultivo	solo	<b>1</b>
	cultivo * mata	cultivo	mata	0
	cultivo * campo	cultivo	campo	0
	cultivo * reflo	cultivo	reflo	0
	<b>cultivo * cultivo</b>	<b>cultivo</b>	<b>cultivo</b>	<b>6</b>

ANEXO VI



## ANEXO VII

### Tabulação Cruzada

#### Classificação Visual X Classificação MaxVer

	(1) * (2)	(1) - Visual	(2) - MaxVer	Pixel	Área
solo	solo * solo	solo	solo	3651	2281875
	solo * mata	solo	mata	1117	698125
	solo * campo	solo	campo	1099	686875
	solo * reflo	solo	reflo	19	11875
	solo * cultivo	solo	cultivo	24	15000
mata	mata * solo	mata	solo	1174	733750
	mata * mata	mata	mata	138422	86513750
	mata * campo	mata	campo	10260	6412500
	mata * reflo	mata	reflo	506	316250
	mata * cultivo	mata	cultivo	1520	950000
campo	campo * solo	campo	solo	1101	688125
	campo * mata	campo	mata	17582	10988750
	campo * campo	campo	campo	72062	45038750
	campo * reflo	campo	reflo	28	17500
	campo * cultivo	campo	cultivo	1452	907500
reflo	reflo * solo	reflo	solo	52	32500
	reflo * mata	reflo	mata	350	218750
	reflo * campo	reflo	campo	19	11875
	reflo * reflo	reflo	reflo	6390	3993750
cultivo	cultivo * solo	cultivo	solo	94	58750
	cultivo * mata	cultivo	mata	1459	911875
	cultivo * campo	cultivo	campo	541	338125
	cultivo * cultivo	cultivo	cultivo	2822	1763750

## Tabulação Cruzada

### Classificação Visual X Classificação MaxVer<sub>filtro1</sub>

	(1) * (2)	(1) - Visual	(2) - MaxVer <sub>filtro1</sub>	Pixel	Área
solo	solo * solo	solo	solo	3442	2151250
	solo * mata	solo	mata	1249	780625
	solo * campo	solo	campo	1168	730000
	solo * reflo	solo	reflo	31	19375
	solo * cultivo	solo	cultivo	20	12500
mata	mata * solo	mata	solo	978	611250
	mata * mata	mata	mata	139351	87094375
	mata * campo	mata	campo	9858	6161250
	mata * reflo	mata	reflo	518	323750
	mata * cultivo	mata	cultivo	1177	735625
campo	campo * solo	campo	solo	1003	626875
	campo * mata	campo	mata	17720	11075000
	campo * campo	campo	campo	72423	45264375
	campo * reflo	campo	reflo	26	16250
	campo * cultivo	campo	cultivo	1053	658125
reflo	reflo * solo	reflo	solo	43	26875
	reflo * mata	reflo	mata	319	199375
	reflo * campo	reflo	campo	14	8750
	reflo * reflo	reflo	reflo	6435	4021875
cultivo	cultivo * solo	cultivo	solo	99	61875
	cultivo * mata	cultivo	mata	1690	1056250
	cultivo * campo	cultivo	campo	610	381250
	cultivo * cultivo	cultivo	cultivo	2517	1573125

## Tabulação Cruzada

### Classificação Visual X Classificação MaxVer<sub>filtro2</sub>

	(1) * (2)	(1) - Visual	(2) - MaxVer <sub>filtro2</sub>	Pixel	Área
solo	solo * solo	solo	solo	2571	1606875
	solo * mata	solo	mata	2354	1471250
	solo * campo	solo	campo	972	607500
	solo * reflo	solo	reflo	13	8125
mata	mata * solo	mata	solo	814	508750
	mata * mata	mata	mata	135837	84898125
	mata * campo	mata	campo	13822	8638750
	mata * reflo	mata	reflo	1215	759375
	mata * cultivo	mata	cultivo	194	121250
campo	campo * solo	campo	solo	515	321875
	campo * mata	campo	mata	17981	11238125
	campo * campo	campo	campo	72004	45002500
	campo * reflo	campo	reflo	1562	976250
	campo * cultivo	campo	cultivo	163	101875
reflo	reflo * solo	reflo	solo	3	1875
	reflo * mata	reflo	mata	100	62500
	reflo * campo	reflo	campo	1018	636250
	reflo * reflo	reflo	reflo	5690	3556250
cultivo	cultivo * solo	cultivo	solo	55	34375
	cultivo * mata	cultivo	mata	1047	654375
	cultivo * campo	cultivo	campo	1277	798125
	cultivo * reflo	cultivo	reflo	1625	1015625
	cultivo * cultivo	cultivo	cultivo	912	570000

## ANEXO VIII

### Tabulação Cruzada

#### Classificação Visual X Classificação IsoSeg

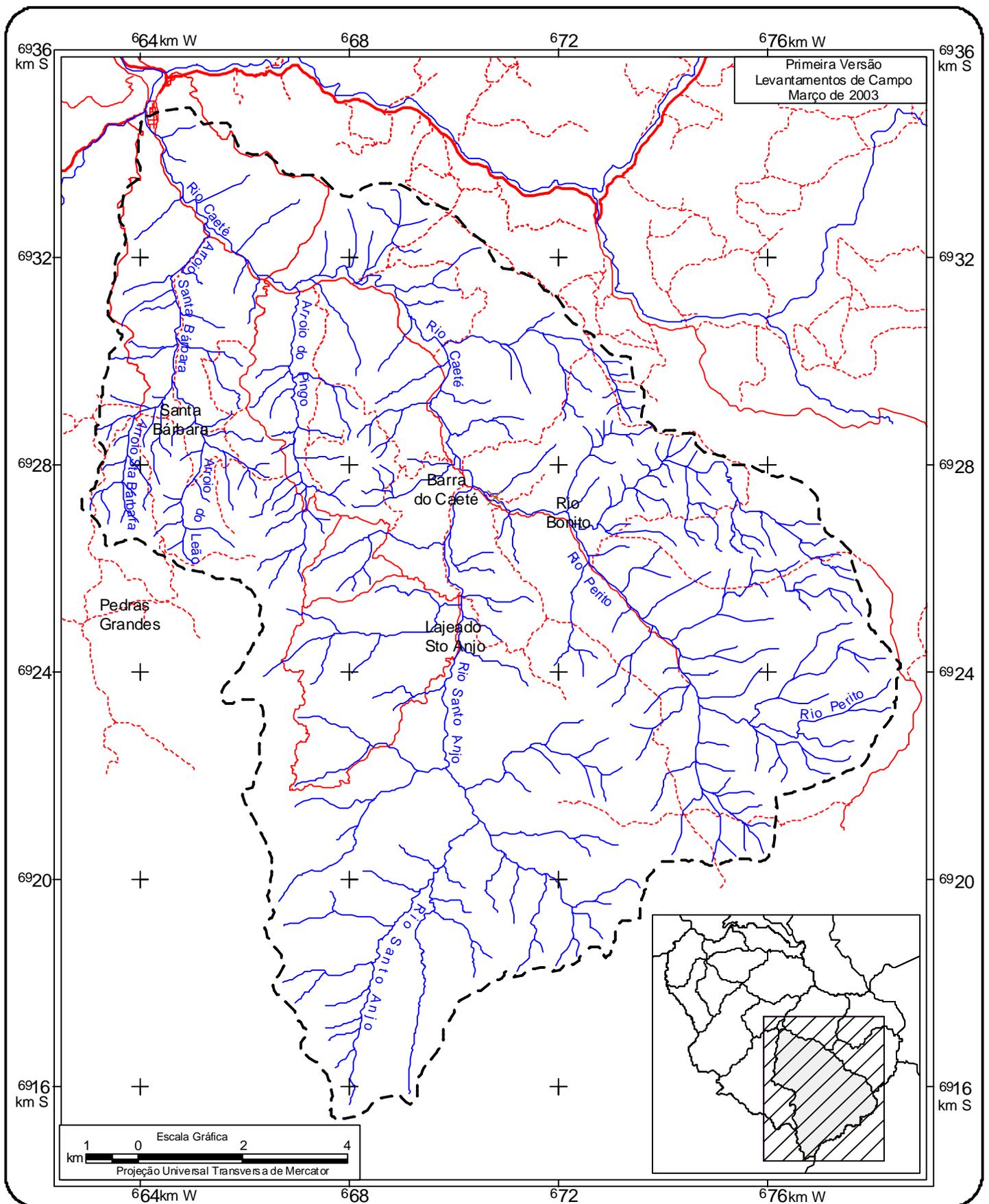
	(1) * (2)	(1) - Visual	(2) - IsoSeg	Pixel	Área
solo	solo * solo	solo	solo	2845	1778125
	solo * mata	solo	mata	1170	731250
	solo * campo	solo	campo	1873	1170625
	solo * reflo	solo	reflo	4	2500
	solo * cultivo	solo	cultivo	18	11250
mata	mata * solo	mata	solo	795	496875
	mata * mata	mata	mata	128827	80516875
	mata * campo	mata	campo	20595	12871875
	mata * reflo	mata	reflo	584	365000
	mata * cultivo	mata	cultivo	1081	675625
campo	campo * solo	campo	solo	1900	1187500
	campo * mata	campo	mata	3982	2488750
	campo * campo	campo	campo	85789	53618125
	campo * reflo	campo	reflo	6	3750
	campo * cultivo	campo	cultivo	548	342500
reflo	reflo * solo	reflo	solo	149	93125
	reflo * mata	reflo	mata	1653	1033125
	reflo * campo	reflo	campo	111	69375
	reflo * reflo	reflo	reflo	4897	3060625
	reflo * cultivo	reflo	cultivo	1	625
cultivo	cultivo * solo	cultivo	solo	45	28125
	cultivo * mata	cultivo	mata	1047	654375
	cultivo * campo	cultivo	campo	1026	641250
	cultivo * cultivo	cultivo	cultivo	2798	1748750

**Tabulação Cruzada**  
**Classificação Visual X Classificação IsoSeg<sub>filtro1</sub>**

	(1) * (2)	(1) - Visual	(2) - IsoSeg <sub>filtro1</sub>	Pixel	Área
solo	solo * solo	solo	solo	2730	1706250
	solo * mata	solo	mata	1232	770000
	solo * campo	solo	campo	1931	1206875
	solo * reflo	solo	reflo	6	3750
	solo * cultivo	solo	cultivo	11	6875
mata	mata * solo	mata	solo	751	469375
	mata * mata	mata	mata	128638	80398750
	mata * campo	mata	campo	20926	13078750
	mata * reflo	mata	reflo	577	360625
	mata * cultivo	mata	cultivo	990	618750
campo	campo * solo	campo	solo	1711	1069375
	campo * mata	campo	mata	4380	2737500
	campo * campo	campo	campo	85608	53505000
	campo * reflo	campo	reflo	7	4375
	campo * cultivo	campo	cultivo	519	324375
reflo	reflo * solo	reflo	solo	144	90000
	reflo * mata	reflo	mata	1650	1031250
	reflo * campo	reflo	campo	112	70000
	reflo * reflo	reflo	reflo	4904	3065000
	reflo * cultivo	reflo	cultivo	1	625
cultivo	cultivo * solo	cultivo	solo	44	27500
	cultivo * mata	cultivo	mata	1139	711875
	cultivo * campo	cultivo	campo	1062	663750
	cultivo * cultivo	cultivo	cultivo	2671	1669375

**Tabulação Cruzada**  
**Classificação Visual X Classificação IsoSeg<sub>filtro2</sub>**

	(1) * (2)	(1) - Visual	(2) - IsoSeg <sub>filtro2</sub>	Pixel	Área
solo	solo * solo	solo	solo	2251	1406875
	solo * mata	solo	mata	1936	1210000
	solo * campo	solo	campo	1702	1063750
	solo * reflo	solo	reflo	21	13125
mata	mata * solo	mata	solo	654	408750
	mata * mata	mata	mata	126655	79159375
	mata * campo	mata	campo	23128	14455000
	mata * reflo	mata	reflo	1237	773125
	mata * cultivo	mata	cultivo	208	130000
campo	campo * solo	campo	solo	860	537500
	campo * mata	campo	mata	6379	3986875
	campo * campo	campo	campo	83917	52448125
	campo * reflo	campo	reflo	975	609375
	campo * cultivo	campo	cultivo	94	58750
reflo	reflo * solo	reflo	solo	87	54375
	reflo * mata	reflo	mata	1350	843750
	reflo * campo	reflo	campo	1041	650625
	reflo * reflo	reflo	reflo	4333	2708125
cultivo	cultivo * solo	cultivo	solo	16	10000
	cultivo * mata	cultivo	mata	866	541250
	cultivo * campo	cultivo	campo	1269	793125
	cultivo * reflo	cultivo	reflo	1505	940625
	cultivo * cultivo	cultivo	cultivo	1260	787500



Município de Alfredo Wagner

**Base Cartográfica  
Sub-bacia do Caeté**

Área 163,59 km<sup>2</sup>  
Escala 1:100.000

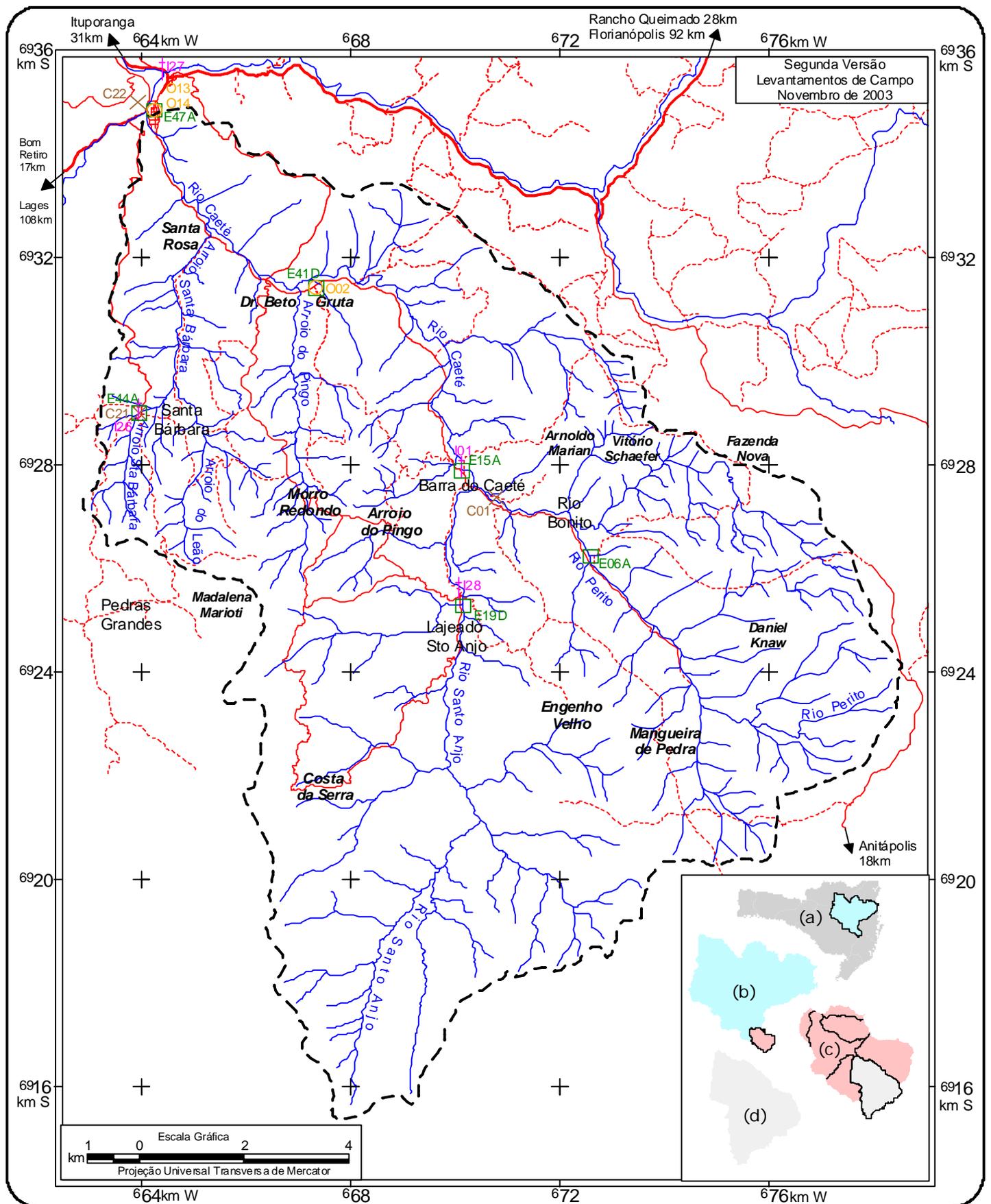
**CONVENÇÕES**

-  Tráfego Permanente
-  Tráfego Periódico
-  Caminho
-  Trilha
-  Rede de Drenagem
-  Divisor de águas

Produzido no Núcleo de Estudos da Água  
Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental  
Centro Tecnológico - Universidade Federal de Santa Catarina

Fonte: Base Cartográfica do Município de Alfredo Wagner  
Arquivo Digital - VIECLI (2002)  
Escala nominal: 1:50.000 - Escala impressa: 1:100.000

Parte integrante da Dissertação de Mestrado de VIECLI (2005):  
"Sensoriamento Remoto Aplicado ao Mapeamento Temático do Uso e  
Cobertura do Solo na Bacia do Caeté, Município de Alfredo Wagner, SC"



Estado de Santa Catarina (a)  
 Bacia Hidrográfica do Rio Itajaí (b)  
 Município de Alfredo Wagner (c)  
 Sub-bacia do Caeté (d)

**Base Cartográfica  
 com Pontos de Referência**

Área 163,59 km<sup>2</sup>  
 Escala 1:100.000

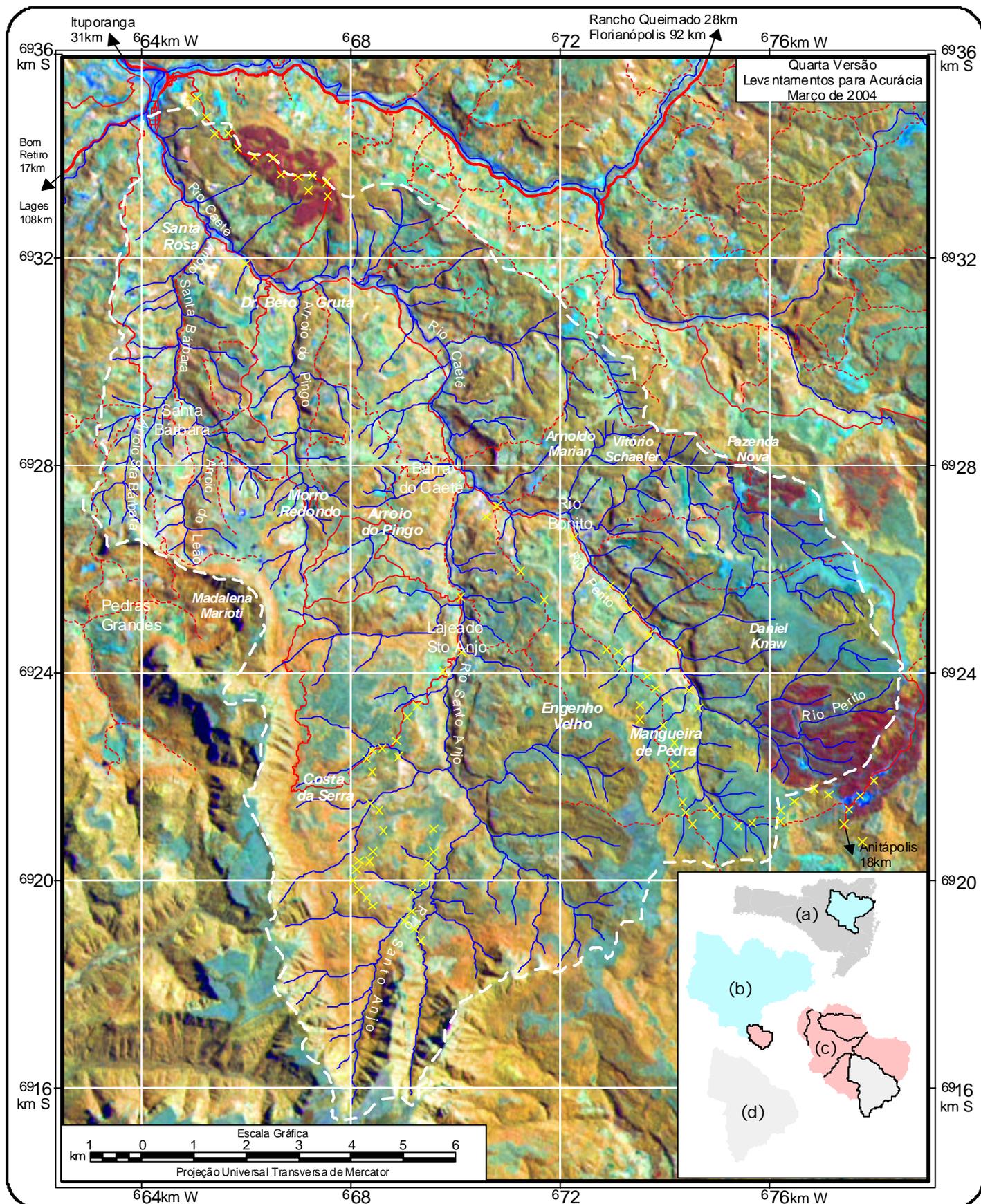
- CONVENÇÕES**
- Tráfego Permanente
  - Tráfego Periódico
  - Caminho
  - Trilha
  - Rede de Drenagem
  - Divisor de águas
- Pontos de Referência: Levantamento EICOs:
- Escola
  - Igreja
  - Cemitério
  - Outros

Produzido no Núcleo de Estudos da Água  
 Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental  
 Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental  
 Centro Tecnológico - Universidade Federal de Santa Catarina

Fonte: Base Cartográfica do Município de Alfredo Wagner  
 Arquivo Digital - VIECILI (2002)  
 Escala nominal: 1:50.000 - Escala impressa: 1:100.000  
 Informações complementares: Prefeitura Municipal de Alfredo Wagner  
 e Levantamento EICOs (Escolas, Igrejas, Cemitérios e Outros)

Parte integrante da Dissertação de Mestrado de VIECILI (2005):  
 "Sensoriamento Remoto Aplicado ao Mapeamento Temático do Uso e  
 Cobertura do Solo na Bacia do Caeté, Município de Alfredo Wagner, SC"





Estado de Santa Catarina (a)  
 Bacia Hidrográfica do Rio Itajaí (b)  
 Município de Alfredo Wagner (c)  
 Sub-bacia do Caeté (d)

**Composição Colorida<sup>1</sup>**  
**Bandas 4R-5G-3B**

**Área 163,59 km<sup>2</sup>**  
**Escala 1:100.000**

**CONVENÇÕES**

- Tráfego Permanente
- Tráfego Periódico
- Caminho
- Trilha
- Rede de Drenagem
- Divisor de águas
- Ponto amostrado<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Composição colorida reamostrada para a resolução espacial de 12,5 metros da banda 8 (pancromática)  
<sup>2</sup>Levantamentos de pontos referentes aos dias 29 de fevereiro, 01, 22 e 23 de março de 2004.

Produzido no Núcleo de Estudos da Água  
 Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental  
 Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental  
 Centro Tecnológico - Universidade Federal de Santa Catarina

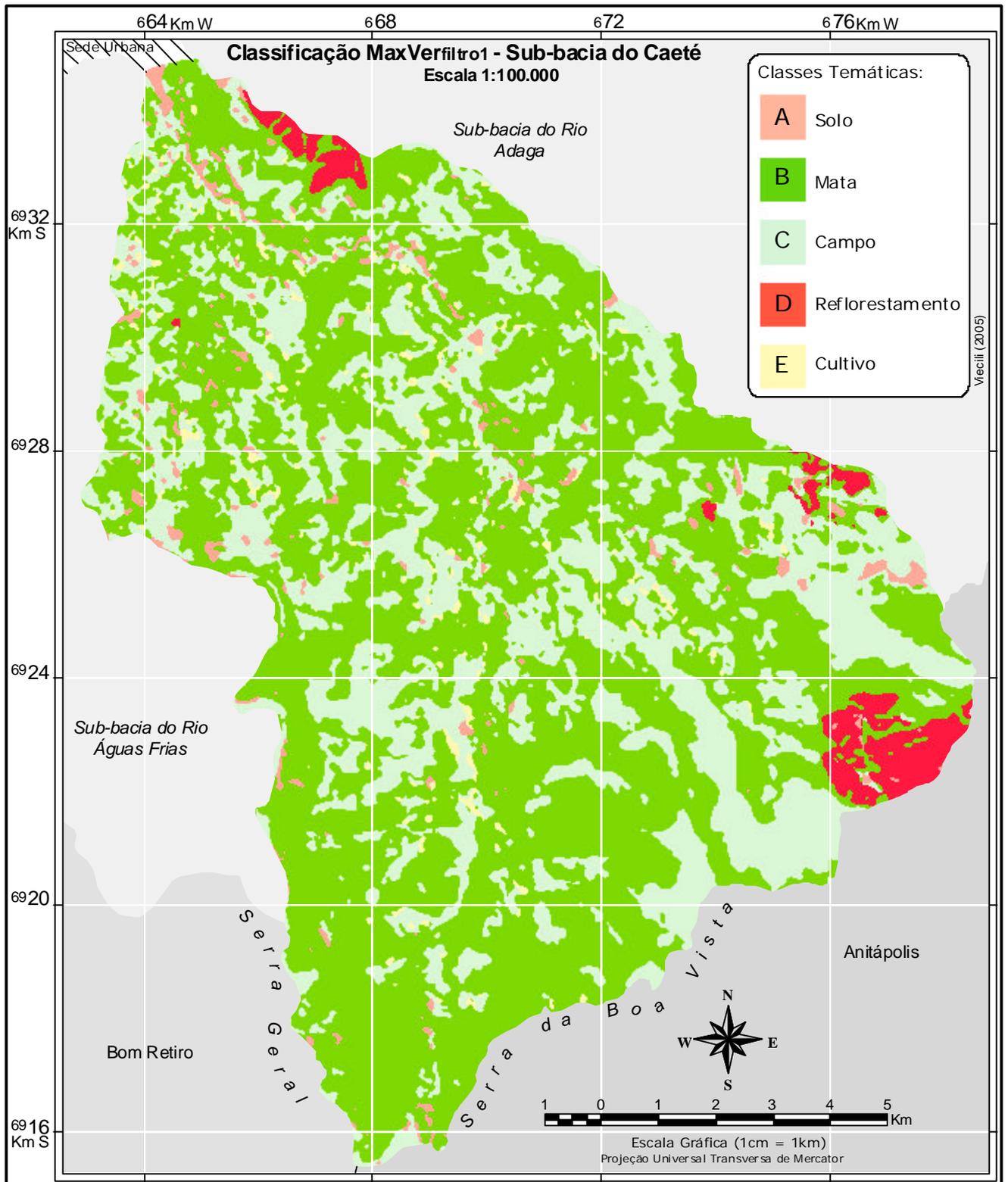
Fonte: Arquivo Digital - VIECILI (2002) - Escala nominal: 1:50.000  
 Produto Orbital: Landsat7 - Sensor ETM+  
 Referente à órbita 220 ponto 079, de 10/03/2002

Informações complementares: Prefeitura Municipal de Alfredo Wagner

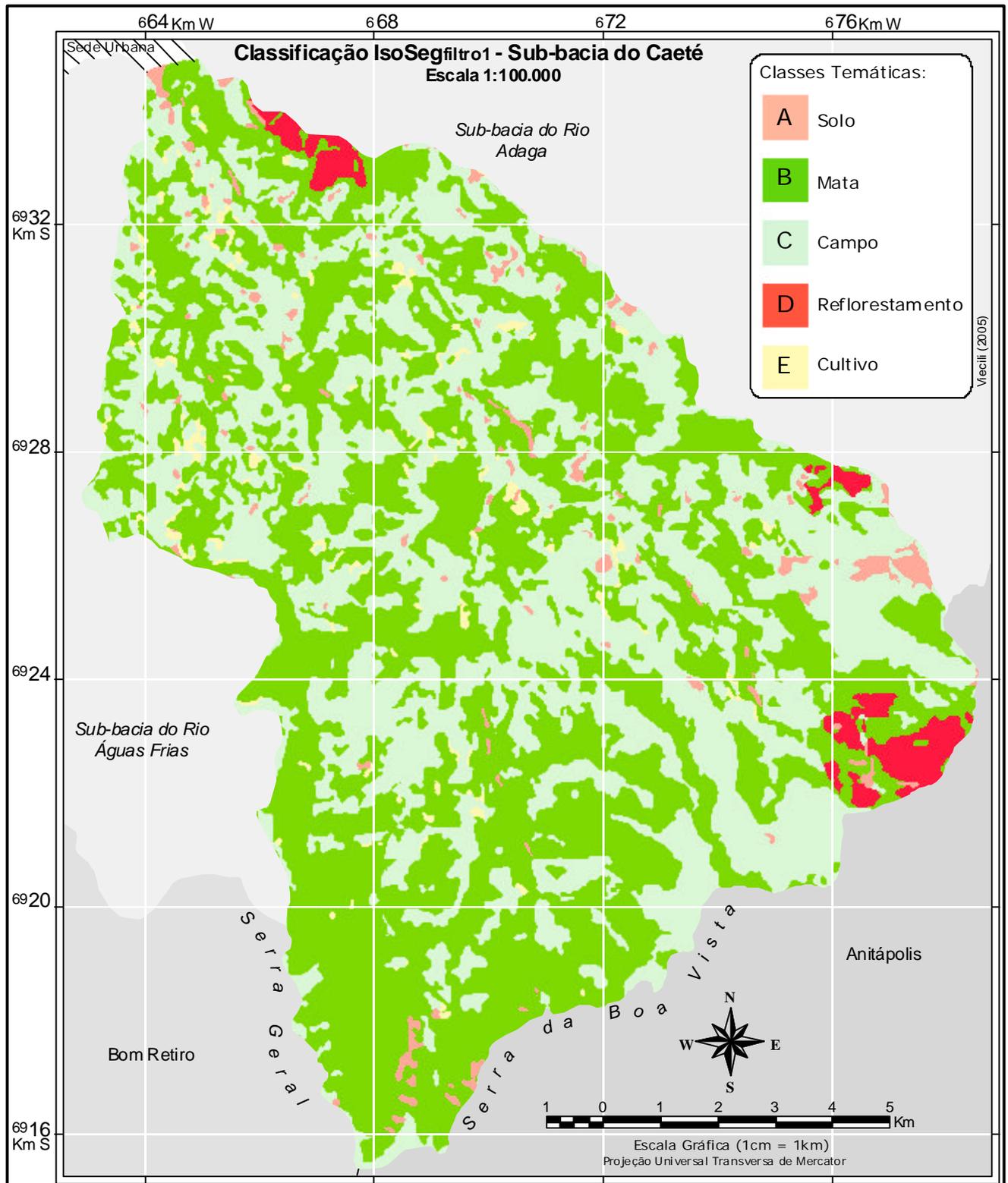
Parte integrante da Dissertação de Mestrado de VIECILI (2005):  
 "Sensoriamento Remoto Aplicado ao Mapeamento Temático do Uso e Cobertura do Solo na Bacia do Caeté, Município de Alfredo Wagner, SC"



ANEXO XIV



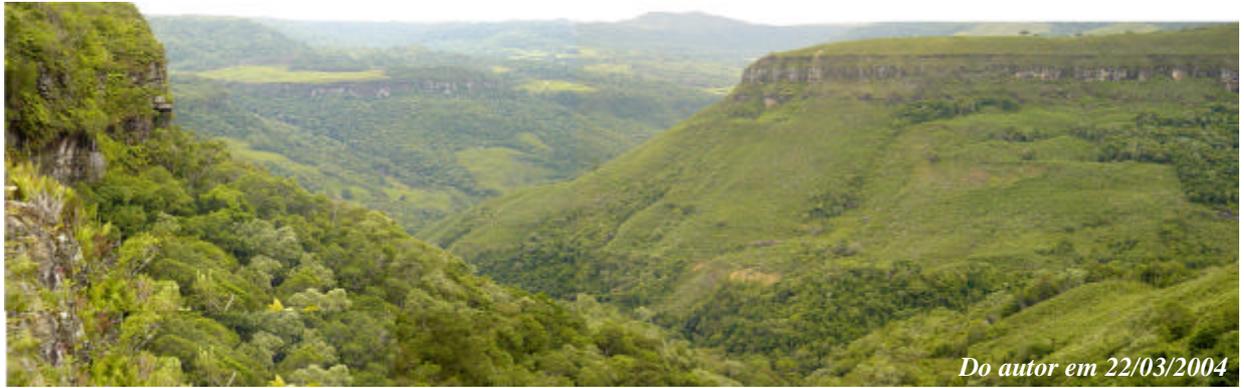
ANEXO XV





*Do autor em 01/03/2004*

Vista Geral da área de estudo



*Do autor em 22/03/2004*

Paisagem Alto Santo Anjo



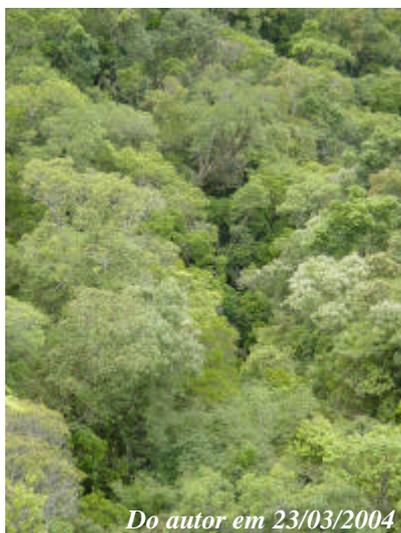
*Do autor em 02/03/2004*

Alto Perito – campo e ao fundo mata



*Do autor em 14/11/2003*

Área de Cultivo – Microbacia do Santo Anjo



*Do autor em 23/03/2004*

mata atlântica



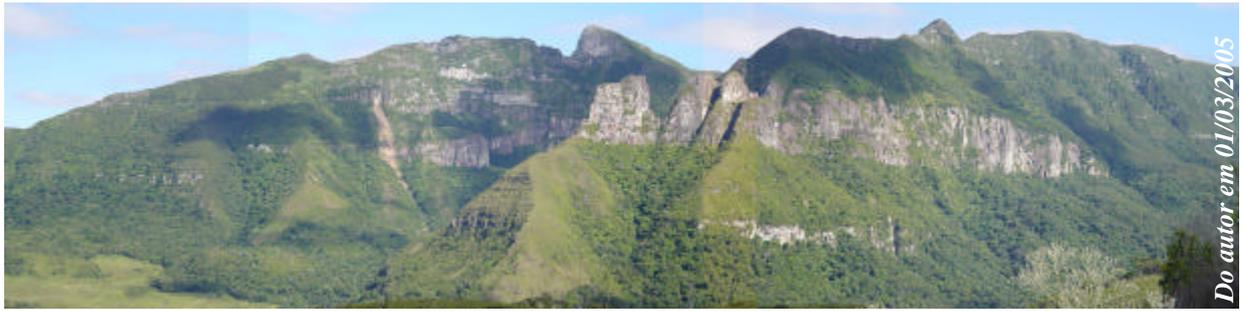
*Do autor em 15/11/2003*

araucária



*Do autor em 29/02/2004*

pinus



Do autor em 01/03/2005

Serra da Boa Vista – Região limítrofe à Bom Retiro

Do autor em 13/11/2003



*mata*

*cultivo*

*pastagem*

Do autor em 13/11/2003



*mata*

*cultivo*

*pastagem*



Do autor em 14/11/2003

*cultivo*

*campo*



Do autor em 16/05/2003

*reflorestamento*

*mata*



Acervo: NEA (2004)

Interação com a comunidade (atividades participativas)