

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
CENTRO ESTADUAL DE PESQUISAS EM SENSORIAMENTO REMOTO E
METEOROLOGIA
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SENSORIAMENTO REMOTO

**APLICAÇÃO DE IMAGENS ASTER PARA ESTUDOS
TERRITORIAIS NO NORDESTE DO ESTADO DO
RIO GRANDE DO SUL**

ANA PAULA LUZ WAGNER

Porto Alegre, junho de 2004.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
CENTRO ESTADUAL DE PESQUISAS EM SENSORIAMENTO REMOTO E
METEOROLOGIA
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SENSORIAMENTO REMOTO

**APLICAÇÃO DE IMAGENS ASTER PARA ESTUDOS
TERRITORIAIS NO NORDESTE DO ESTADO DO
RIO GRANDE DO SUL**

ANA PAULA LUZ WAGNER
Bacharel em Física

Orientador: Prof Dr. Jorge Ricardo Ducati

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Sensoriamento Remoto, nas áreas de concentração em Recursos Naturais e do Meio Ambiente e Desenvolvimento de Novas Metodologias.

Porto Alegre, junho de 2004.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente e sempre ao meu Princípio Deus Infinito, fonte de toda a inteligência.

Agradeço também:

- Ao Centro Estadual de Pesquisas em Sensoriamento Remoto e ao Programa de Pós-Graduação, em nome dos Coordenadores, professora Denise Fontana e professor Jorge Ducati pelo inumerável apoio e infra-estrutura.
- Ao EOSDIS da NASA, pela cedência da imagem do sensor ASTER.
- Ao Instituto de Geociências da UFRGS, pelo processamento dos pontos adquiridos em campo.
- Ao Instituto Brasileiro do Meio Ambiente – IBAMA - e ao Parque Nacional dos Aparados da Serra, pela permissão da circulação em todas as áreas do parque.
- À *Nature Conservancy* do Brasil, por financiar a quase totalidade do projeto.
- Aos colegas Lílian Lima, Maciel Zortea e Rafael do Patrocínio, porque suas participações foram importantíssimas.
- Ao professor Jorge Ducati, pela orientação, dedicação e apoio em todos os momentos.
- Aos meus queridos pais, porque deles é o mérito das minhas conquistas.
- Aos meus eternos amores Leandro e Lucas, pela paciência nas incontáveis horas de trabalho e pelo carinho e amor nas poucas horas de descanso, sem eles nada teria sentido.

APLICAÇÃO DE IMAGENS ASTER PARA ESTUDOS TERRITORIAIS NO NORDESTE DO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL¹

Ana Paula Luz Wagner

ORIENTADOR: Prof. Dr. Jorge Ricardo Ducati

SINOPSE

É apresentada uma nova abordagem na técnica e na avaliação de área de florestas nativas, exóticas e uso do solo do Nordeste do Estado do Rio Grande do Sul, em particular no entorno da escarpa que divide os Campos de Cima da Serra e a Planície Costeira, caracterizada por apresentar espécies de *Pinus elliotti Engelm var elliottii* e *Pinus taeda L.*, *Eucalyptus sp.* e *Araucaria angustifolia (Bert.) O. Ktze.* e áreas de campo nativo. Nas últimas décadas tem se verificado avanço das florestas exóticas, principalmente de florestas de pinus, sobre as áreas de campo e florestas nativas, surgindo como uma das maiores fontes de exploração econômica da região. Parcialmente em razão disto, as florestas de araucária distribuem-se de forma pouco homogênea, em decorrência de décadas de desmatamento. As técnicas de classificação em Sensoriamento Remoto, usando imagens de Landsat, mostraram que é possível separar tipos diferentes de vegetação, e no exemplo das florestas na região estudada, tanto nativas como exóticas. As limitações em definições espacial e espectral até meados da década de 1990 motivaram o desenvolvimento de uma nova geração de satélites e sensores, incluindo o sensor ASTER a bordo do satélite Terra. Este sensor apresenta 14 bandas espectrais com diferentes resoluções espaciais, sendo usado nesta pesquisa suas 9 bandas correspondentes ao espectro de radiação refletida. O foco central deste trabalho está na utilização de sensoriamento remoto e geoprocessamento para determinação de áreas de vegetação e uso do solo no extremo leste dos Campos de Cima da Serra, através de imagens orbitais do sensor ASTER. Utilizando métodos de classificação supervisionada foi possível caracterizar a área, separar as espécies vegetais entre si, além de quantificá-las. O grupo das 9 bandas foram distribuídas em três grupos: com 3 bandas de resolução espacial de 15 metros no visível e infravermelho próximo (VNIR); com 6 bandas com resolução espacial de 30 metros no infravermelho médio (SWIR); e com 9 bandas com resolução espacial de 30 metros cobrindo toda a faixa de resolução espectral do espectro de radiação refletida do sensor ASTER (VNIR+SWIR). A metodologia incluiu processamento de imagem e classificação com o algoritmo de máxima verossimilhança gaussiana. Os resultados são: 1) é possível identificar tipos diferentes de manejo e idade nas florestas de *Pinus elliottii* (jovens, adulto, velho e manejado diferenciado); 2) a exatidão geral foi de 90,89% no subsistema VNIR, e o índice do *Kappa* foi de 0,81 em ambos subsistemas VNIR e (VNIR+SWIR); 3) a classificação apresentando o mapa do uso do solo mostra que, de forma geral, os dados de VNIR têm

os melhores resultados, incluindo o detalhamento para pequenas áreas da superfície terrestre. O grupo (VNIR+SWIR) têm potencial superior para a determinação das classes “araucária”, “eucalipto” e “pinus com manejo”/ “pinus adulto”, enquanto que o grupo SWIR não apresenta não vence em nenhuma classe; 4) com relação aos dados de exatidão geral resultantes do subsistema VNIR, a área estimada de pinus é 22,28% da área estudada (cena de 1543,63 quilômetros quadrados totais), e de araucária é 10,10%, revelando que aquela espécie exótica está mudando rapidamente a paisagem da região. Na comparação destes resultados com outros estudos na região pesquisada, verifica-se que a utilização de dados ASTER implica em um aumento na acurácia da classificação de vegetação em geral e que este sensor é altamente apropriado para estudos ambientais, devido a suas excelentes características espaciais e espectrais.

¹ Dissertação de Mestrado em Sensoriamento Remoto, Centro Estadual de Pesquisas em Sensoriamento Remoto e Meteorologia, Curso de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre / RS, (100 p.), Junho, 2004.

APPLICATION OF ASTER IMAGES TO TERRITORIALS STUDIES IN NORDESTE OF ESTADO OF RIO GRANDE DO SUL²

Ana Paula Luz Wagner

ADVISOR: Prof. Dr. Jorge Ricardo Ducati

ABSTRACT

A new approach in the study of native and exotic forests and soil use in the North-East of Rio Grande do Sul State, Brazil, is presented. The precise region is the area around the slope which separates the Campos de Cima da Serra from the Coastal Plains. This countryside features trees from the species *Pinus elliotti Engelm var elliottii* and *Pinus taeda L.*, *Eucalyptus sp.* and *Araucaria angustifolia (Bert.) O. Ktze*, besides native grasslands. In recent decades an expansion of exotic forests has been observed, mainly pinus, over former areas of native forests and grasslands, becoming one the main economic activities in the region. After decades of deforestation, the araucária is now distributed in a non-homogeneous form. Remote sensing classification techniques, using Landsat images, have shown that it is possible to separate different kinds of vegetation, and in the case of forests in this region of interest, to separate native from exotic forests. Limitations in spatial and spectral resolutions, in Landsat products, have lead to the development of a new generation of satellites and sensors, including the ASTER sensor aboard Terra spacecraft. This sensor presents 14 spectral bands with various spacial resolutions, featuring several high-level products. This work is focused in the use of remote sensing and geoprocessing in the description of vegetation and soil use at the east border of the Campos de Cima da Serra, using ASTER images. By supervised classification it was possible to characterize the studied region, separating and quantifying plant species. The ASTER bands were divided in three groups: one with the three bands with 15 meters spacial resolution, at the visible and near infrared (VNIR group); a second group with the six bands with 30 meters resolution, at the mean infrared (SWIR group); and a third group with all nine bands, binned to 30 meters (VNIR + SWIR group). The methodology included image processing and classification with the gaussian maximum likelihood algorithm. Results are: 1) it is possible to identify different ages and modes of handling in forests of pinus (young, adult, old trees and specially treated plots); 2) the general accuracy was 90.89% in VNIR subsystem, and the kappa index was 0.81 in both subsystems VNIR and (VNIR+SWIR); 3) the classification leading to the soil use map shows that, in general form, VNIR data presents the best results, including the best detailed description for small areas. Nevertheless, VNIR+SWIR has better potential for dealing with the classes araucaria, eucalyptus and treated pinus/adult pinus. 4) with respect to results from the VNIR subsystem, the estimated surface of pinus covers 22.28% of the studied area, on a total studied area of 1543.63 square kilometers, while the araucaria overs 10.10%, indicating that exotic species is rapidly changing

the region landscape. Finally, taking into account the difficulties to compare this results with those few others on the region, we conclude that the use of ASTER data leads to an increase of the classification accuracy of vegetation. This sensor is highly appropriated to environmental studies, due to its excellent spatial and spectral characteristics, and to the easy access to its images.

² MASTER of Science Thesis, Centro Estadual de Pesquisas em Sensoriamento Remoto e Meteorologia, Graduate Course in Remote Sensing, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre/RS, (100 p.), June, 2004.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	12
1.1. O Sensoriamento Remoto.....	12
1.2. Proposta do Trabalho.....	13
2. JUSTIFICATIVAS E DESCRIÇÃO DA ÁREA.....	16
2.1. Apresentação do Problema.....	16
2.2. Descrição da Área.....	17
2.3. O Satélite Terra/Sensor ASTER como Ferramenta para este Trabalho.....	25
3. FUDAMENTAÇÃO TÉCNICA.....	26
3.1. O Processo e Aquisição de Informações.....	27
3.2. Características Espectrais dos Alvos.....	29
3.3. Imagens Digitais.....	32
3.3.1. Atributos e Características das Imagens Digitais.....	33
3.3.2. Utilização de Imagens Digitais.....	34
3.3.2.1. Processamento de Imagens Digitais.....	34
3.3.2.2. Correções de Erros e Registro de Imagens Digitais.....	36
3.3.2.3. Classificação Digital de Imagens.....	38
3.3.3. Avaliação da Exatidão de Mapeamento.....	40
4. MATERIAL E MÉTODOS.....	43
4.1. Características do Sensor ASTER.....	45
4.1.1. Produtos ASTER	48
4.1.2 Parâmetros Radiométricos.....	50
4.2 Aquisição e Análise dos Dados.....	52
4.2.1 Dados Orbitais.....	52
4.2.2 Dados de Campo e Cartas Oficiais.....	53
4.3 Processamento e Pré-classificação.....	54
4.3 Classificação Supervisionada.....	56
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	63
6. CONCLUSÕES.....	85
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	87
ANEXO 1 – Pontos de Precisão Medidos em Campo.....	90
ANEXO 2 – Tabelas de Correlação.....	92

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1. Qualidade de Classificação associada aos valores da estatística <i>Kappa</i>	42
Tabela 2. Características dos subsistemas ASTER.....	47
Tabela 3. Dados de produtos padrão de ASTER Alto-Nível. Adaptado de Abrams, 1999.....	49
Tabela 4. Métodos de reamostragem e projeção dos produtos LIB.....	50
Tabela 5. Máximo de radiância ASTER em todos os ganhos (Abrams, 1999).....	51
Tabela 6. Coeficientes de conversão calculados.....	51
Tabela 7. Erro médio quadrático na correção geométrica de VNIR e SWIR.....	55
Tabela 8. Chave de símbolos da matriz de confusão.....	63
Tabela 9. Matriz de confusão derivada da classificação no subsistema VNIR.....	67
Tabela 10. Matriz de confusão derivada da classificação no subsistema SWIR.....	67
Tabela 11. Matriz de confusão derivada da classificação no subsistema VNIR + SWIR.....	68
Tabela 12. Resultados da Diagonal Principal da Matriz de Confusão nos subsistemas	68
Tabela 13. Erros de Omissão e Comissão expressos em percentuais, subsistema VNIR....	70
Tabela 14. Erros de Omissão e Comissão expressos em percentuais, subsistema SWIR....	71
Tabela 15. Erros de Omissão e Comissão expressos em percentuais, (VR + SR).....	71
Tabela 16. Acurácia Total e Índice <i>Kappa</i> para as diferentes classificações.....	72
Tabela 17. Correlações entre bandas da classe Araucária no subsistema VNIR.....	73
Tabela 18. Correlações entre bandas da classe Araucária no subsistema SWIR.....	73
Tabela 19. Correlações entre bandas da classe Araucária no subsistema (VR + SR).....	73
Tabela 20. Comparação entre as áreas das classes obtidas nos três grupos classificados....	75
Tabela 21. Comparação dos percentuais das classes em cada subsistema.....	75
Tabela 22. Radiância Média das classes no subsistema VNIR.....	77
Tabela 23. Radiância Média das classes no subsistema SWIR.....	78
Tabela 24. Radiância Média das classes no subsistema (VNIR + SWIR).....	78
Tabela 25. Comparação das classes de interesse em relação a dados bibliográficos.....	82

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Divisão municipal e urbana do Rio Grande do sul. Fonte: SAA-2002/IPEA – 2000. O retângulo assinala a região de estudo.....	18
Figura 2. 2a. Rio Grande do Sul, mapa Hipsométrico. Fonte: Mapa Hipsométrico do Rio Grande do Sul, 1966. Elaboração: UFRGS/CEPSRM-SCP/DEPLAN-2004. 2b. Composição colorida R:2;G:3N;B:1, cena ASTER. mostrando a declividade.....	19
Figura 3. 3a . Temperatura média anual do Estado do Rio Grande do Sul. Fonte:SEMC – Atlas Eólico do Rio Grande do Sul - 2002. 3b . Precipitação média anual do Estado do Rio Grande do sul. Fonte:SEMC –Atlas Eólico do Rio Grande do Sul - 2002.....	20
Figura 4 – Reserva da Biosfera da Mata Atlântica no Estado do Rio Grande do Sul. Fonte: Conselho Nacional de Reserva da Biosfera da Mata Atlântica – 1996.....	21
Figura 5. – Aspectos fitoecológicos da área de estudo.....	24
Figura 6. Interação da radiação solar com a atmosfera terrestre. Causas das atenuações da energia solar ao atravessar a atmosfera terrestre (Moreira 2003, pág. 30).....	28
Figura 7. O espectro eletromagnético, a transmissividade atmosférica e os comprimentos de onda usados em sensoriamento remoto (Fonte: Kronberg, 1984, p.4).....	28
Figura 8. A interação da radiação eletromagnética nos comprimentos de onda no visível, infravermelho próximo e médio com a vegetação (Fonte: Curran, 1988).....	31
Figura 9. Curvas de reflectância para diferentes texturas, estruturas e misturas de solo (Fonte: Curran, 1988. Modificado de Bowers e Hanks 1965; Hoffer e Johannsen 1969).....	31
Figura 10. Efeito do registro sobre a imagem.....	37
Figura 11a. Mapa de localização da área e divisão municipal. Na parte superior de cada quadrícula consta o nome de cada carta na escala 1:100.000. Em pequenos caracteres estão os nomes dos municípios. (Fonte: Ducati <i>et al.</i> , 1999). A área destacada corresponde à região estudada.....	44
Figura 11b. Modelo Numérico de elevação, resolução espacial de 30 metros, gerado através das bandas 3N e 3B, ainda sem ajuste no ângulo de rotação da imagem original. As altitudes crescem na escala do preto ao branco, que correspondem de 0 até 1300 metros respectivamente.....	44
Figura 12a. Região espectral do sensor ASTER, com suas 14 bandas. Figura 12b. Comparação das bandas espectrais do ASTER e Landsat TM. “% Ref.” é a reflectância percentual.....	46
Figura 13. Imagem recortada da cena ASTER L1B, subsistema VNIR.....	57
Figura 14. Imagem recortada da cena ASTER L1B, subsistema SWIR.....	58

Figura 15. Imagem recortada da cena ASTER L1B, subsistema (VNIR + SWIR) redimensionalizado.....	59
Figura 16 a. Algumas áreas das classes amostradas.....	60
Figura 16 b. Algumas áreas das classes amostradas.....	61
Figura 17. Fileiras de pinus retiradas de dentro da mata de forma sistemática. Esta técnica pode ser observada nas imagens em todos os subsistemas VNIR e SWIR.....	62
Figura 18. Classificação supervisionada por Máxima Verossimilhança Gaussiana no subsistema VNIR.....	64
Figura 19. Classificação supervisionada por Máxima Verossimilhança Gaussiana no subsistema SWIR.....	65
Figura 20. Classificação supervisionada por Máxima Verossimilhança Gaussiana nos subsistemas VNIR + SWIR.....	66
Figura 21. Comparação dos valores da diagonal principal das matrizes de confusão dos três grupos.....	69
Figura 22. Mapa das Araucárias na região de pesquisa gerado pela classificação (VNIR + SWIR). As áreas de araucária estão apresentadas em verde.....	77
Figura 23. Radiância Média das classes em cada banda – subsistema VNIR.....	79
Figura 24. Radiância Média das classes em cada banda – subsistema (VR + SR).....	80
Figura 25. Radiância Média das classes em cada banda – subsistema SWIR.....	81

1. INTRODUÇÃO

1.1. O Sensoriamento Remoto

Pode-se definir Sensoriamento Remoto como a ciência e a técnica de obtenção de dados ou coleta de informações à distância, através do uso de sensores, os quais podem ser aéreos ou espaciais. Esta coleta de dados a respeito de objetos à distância é feita de modo passivo ou ativo, pela recepção ou emissão de fótons. A informação coletada, em geral, radiação eletromagnética, é freqüentemente organizada na forma de imagens.

Segundo “Princípios sobre Sensoriamento Remoto” da Resolução 41/65 da Assembléia Geral da ONU, de 9 de dezembro de 1986, define-se, pelo Princípio I, que:

“a) O termo «sensoriamento remoto» significa o sensoriamento remoto da superfície da Terra a partir do espaço que utiliza as propriedades das ondas eletromagnéticas emitidas, refletidas ou difracionadas pelos objetos sensoriados, para melhorar a gestão dos recursos naturais, o uso da terra e a proteção do meio ambiente;”.

Essa técnica restringiu-se, inicialmente, à interpretação visual de fotografias aéreas. O processamento digital de imagens, como atividade de Sensoriamento Remoto, iniciou-se em 1960 (Moreira, 2001) com um pequeno número de pesquisadores analisando dados obtidos por imageadores multiespectrais instalados a bordo de aeronaves, e com análises de fotos aéreas digitalizadas. Entretanto, foi só a partir de 1972, com o lançamento do satélite Landsat-1, que imagens digitais começaram a ser utilizadas em aplicações de Sensoriamento Remoto da superfície da terra. Com o incremento no progresso de pesquisas em sensores eletrônicos e o advento dos computadores digitais, o sensoriamento remoto adquiriu novas possibilidades e dimensões. No Brasil, as atividades espaciais iniciaram-se

no início dos anos de 1960, com a definição de metas para dotar o País de infra-estrutura para realização de trabalhos envolvendo o espaço, capacitando pesquisadores e equipes na área, e promovendo a cooperação com outros países.

Os objetos de estudo do sensoriamento remoto, genericamente designados como “alvos”, podem ser quaisquer formas sobre a superfície terrestre, tais como corpos de água, tipos de vegetação e solos, áreas desmatadas, etc. Atualmente, grande parte dos estudos em recursos naturais faz uso de imagens de satélite. O Brasil é um país que apresenta dimensões continentais, contendo as mais variadas características regionais, vastos ecossistemas, questões ambientais de inúmeros tipos, expansões das fronteiras agrícolas e riquezas de recursos naturais necessitando de mapeamento e gerenciamento. A utilização de todos os potenciais da tecnologia espacial, especialmente do sensoriamento remoto, para o conhecimento, mapeamento, uso e monitoramento de seus recursos, fornece os meios para um desenvolvimento sustentável adequado.

Através das técnicas de sensoriamento remoto é possível acompanhar fenômenos que se desenvolvem sobre grandes áreas da superfície terrestre. Isto inclui, por exemplo, a detecção, análise e quantificação da introdução de essências exóticas sobre cobertura vegetal nativa. Este fenômeno, muito comum no Brasil, é resultado de modelos de desenvolvimento nos quais se considera a maximização do benefício monetário em detrimento do impacto da ocupação antrópica inadequada sobre o meio físico. Os resultados negativos aparecem em processos de perda da reserva de nutrientes do solo, contaminação físico-química dos recursos hídricos, impactos sobre ecossistemas localmente adaptados, extinção de espécies de fauna e flora, e outros.

1.2. Proposta de Trabalho

Neste trabalho propõe-se utilizar dados e métodos de Sensoriamento Remoto sobre uma área específica. A região no extremo leste dos Campos de Cima da Serra no Estado do Rio Grande do Sul foi escolhida a fim de demonstrar o potencial do sensoriamento remoto como uma ferramenta de verificação da quantidade e variabilidade da mata nativa e exótica, bem como o comportamento espectral das diferentes feições que caracterizam o uso do

solo. A área pesquisada é bem conhecida por seu ciclo de exploração predatória das riquezas nativas e posterior inserção de vegetação exótica para exploração econômica.

Estas feições já foram estudadas nesta região do Rio Grande do Sul através das técnicas de sensoriamento remoto, utilizando diferentes satélites artificiais (Ducati et al, 1999). A existência de dificuldades em mapeamento de espécies vegetais com respostas espectrais semelhantes e classes de alvos com pequena distribuição espacial motivaram a utilização de um satélite multiespectral. Dentre a nova geração dos satélites de média resolução destaca-se o satélite Terra, o qual tem a bordo o sensor ASTER (*Advanced Spaceborne Emission and Reflection Radiometer*). Este sensor gera imagens de média resolução espacial e espectral e tem uma expectativa superior para o mapeamento destes padrões de vegetação e uso do solo, sendo este escolhido para o presente trabalho.

A área a ser pesquisada corresponde ao extremo leste dos Campos de Cima da Serra, inserida entre as latitudes $-28^{\circ}41'S$ e $-29^{\circ}15'S$ e as longitudes $-49^{\circ}54'W$ e $-50^{\circ}18'W$. Situa-se no Nordeste do Estado do Rio Grande do Sul, abrangendo parte dos municípios de Jaquirana, Bom Jesus, São Francisco de Paula, São José dos Ausentes e a quase totalidade do município de Cambará do Sul, ocupando uma área de aproximadamente 1.542 km^2 . A imagem ASTER (L1B) utilizada corresponde à órbita 4954, de 22 de novembro de 2000.

As fases de trabalho foram:

1ª Fase: Processamento e Pré-Classificação. Aquisição, seleção e recorte da área a ser estudada. Análise visual dos padrões de interesse e classificação não-supervisionada Isodata. Localização das classes que são objeto de estudo através de instrumento GPS (*Global Positioning System*) em saídas em campo, utilizados também na definição de pontos de controle para melhoria do georeferenciamento da imagem ASTER L1B já georeferenciada. Conversão dos contadores digitais para valores de radiância com a aplicação do coeficiente de unidade de conversão, dados os valores de ganho e “*offset*” por banda.

2ª Fase: Classificação pelo Método de Máxima Verossimilhança. Recortes finais da área, delimitando a quebra do declive dos Campos de Cima da Serra com a encosta. Agrupamento das 9 bandas em 3 grupos:

- grupo 1(VNIR): bandas 1,2,3N, resolução espacial de 15 metros.
- grupo 2 (SWIR): bandas 4,5,6,7,8,9, resolução espacial de 30 metros.
- grupo 3 (VNIR + SWIR): bandas 1,2,3N,4,5,6,7,8,9, resolução espacial de 30 metros. As três primeiras bandas foram redimensionalizadas pelo método “vizinho mais próximo”.

3ª Fase: Avaliação da Exatidão de Mapeamento. Avaliação dos resultados dos três grupos de classificação através da exatidão de mapeamento, usando as técnicas de Matriz de Confusão, Acurácia Total e Índice *Kappa*. Análise estatística, por classe, identificando a Distribuição pela Radiância Média, Erros de Comissão e Omissão, e Correlação entre Bandas. Estimativa da área das florestas exóticas sobre áreas de campo e mata nativa.

Foram escolhidas, para classificação supervisionada feições de 13 classes: mata nativa, mata de araucária, florestas de eucalipto, florestas de pinus (pinus jovem, pinus adulto, pinus velho, pinus com manejo diferenciado) em diferentes estágios - descritos de forma completa no capítulo 4, área de plantio, solo exposto, área de queimadas, nuvem, sombra e campo.

Após a classificação dos três grupos de imagens foi possível definir qual deles apresenta o melhor resultado na determinação da extensão dessas classes, as quais estão modificando intensamente esta região do Estado do Rio Grande do Sul.

2. JUSTIFICATIVA E DESCRIÇÃO DA ÁREA

2.1. Apresentação do Problema

O ciclo de exploração predatória das riquezas nativas no Nordeste do Estado do Rio Grande do Sul iniciou-se no final dos anos de 1890 com a ocupação destas áreas, principalmente devido à entrada de imigrantes europeus. Espécies como a *Araucaria angustifolia* (Bert.) O. Ktze. ou pinheiro brasileiro, e madeiras nobres como cedro, canela, cambará, louro entre outras, tiveram forte retração e foram até mesmo consideradas como em via de extinção. Este ciclo teve esgotamento em meados da década de 60 devido em parte pelo exaurimento de espécies como a araucária, bem como, pelas exigências por produções de larga escala na indústria internacional.

Após a fase extrativista o setor industrial adaptou-se através da inserção de matas de algumas essências exóticas, principalmente de pinus, eucalipto e acácia. O extremo leste dos Campos de Cima da Serra – objeto deste estudo – caracteriza-se pela presença dominante da espécie de *Pinus elliotti* Engelm. var *elliottii*, melhor adaptada para esta sub-região. Antes da substituição do bioma natural – campos e florestas – por espécies vegetais de alta lucratividade, como o pinus, a região era caracterizada por exploração pastoril, com algum melhoramento através do cultivo de pasto.

A intensificação do número de florestas de pinus e eucalipto em vários estágios têm suscitado a atenção de pesquisadores em relação aos efeitos da presença destes maciços e das modificações de elementos componentes da estrutura física dos ecossistemas e da paisagem como um todo. Neste contexto, é imprescindível estimar, com a melhor exatidão possível, a incidência destas atividades e uso do solo sobre estas áreas.

2.2. Descrição da Área

A região geográfica de estudo está inserida, num contexto geral, na borda leste do Planalto Meridional, limite definido pelos Aparados da Serra Geral com a Planície Costeira. Orograficamente, o planalto é o acidente mais considerável do Estado, cuja altitude aumenta de oeste para leste. A pesquisa foi executada nas áreas de maior altitude, cerca de 900 a 1200 metros, até os Aparados de Bom Jesus (Figuras 1 e 2).

Em relação ao clima, a área de pesquisa situa-se na região climática do Estado do Rio Grande do Sul, pertencente ao clima temperado do tipo subtropical, classificado como mesotérmico úmido. Devido à sua posição geográfica, o estado destaca-se pelas diferenças em relação ao Brasil. A latitude reforça as influências das massas de ar oriundas da região polar e da área tropical continental e Atlântica. A movimentação e os encontros destas massas definem muitas de nossas características climáticas. As temperaturas apresentam grande variação sazonal, com invernos rigorosos e ocorrência de geada e precipitação eventual de neve no extremo leste (Fig. 3a). O volume de chuvas com maior intensidade ocorre à Nordeste do estado, especialmente na encosta do planalto (Fig.3b).

Hidrograficamente, a área estudada está inserida sobre a bacia hidrográfica do sistema Taquari-Antas pertencente à região hidrográfica do Guaíba. Esta sub-bacia situa-se na região Nordeste do Estado do Rio Grande do Sul, abrangendo uma área de 26.428 km², equivalente a 9% do território estadual, e 98 municípios, inseridos total ou parcialmente. Limita-se ao norte com a bacia do rio Pelotas, a oeste e ao sul com a bacia do rio Jacuí e a sul com as bacias dos rios Caí e Sinos. Trata-se do principal afluente do rio Jacuí, maior formador do Guaíba. O rio Taquari nasce no extremo leste do Planalto dos Campos Gerais, com a denominação de rio das Antas, até a confluência com o rio Guaporé, nas imediações da cidade de Muçum.

O sistema Taquari-Antas tem suas nascentes nos municípios de Cambará do Sul e Bom Jesus, numa região de baixa densidade populacional, onde predomina a criação extensiva de gado e plantações de florestas exóticas. Hidrologicamente pode ser caracterizada por regimes de fortes chuvas, de escoamentos superficiais rápidos e bruscos

variações de descargas, por apresentar declividade média elevada, rede de drenagem densa com tendência radial, pouca cobertura vegetal, pouca profundidade e baixa permeabilidade dos solos (<http://www.fepam.rs.gov.br/qualidade/taquariantas.asp>).

Quanto à vegetação, a bacia do rio Taquari-Antas apresenta quatro regiões fitoecológicas associadas à Mata Atlântica e consideradas como zona de transição: Savana, Floresta Ombrófila Mista, Floresta Estacional Decidual e Áreas de Tensão Ecológica (Rempel, 2000). Estes Campos de Cima da Serra, localizam-se na área de Reserva de Biosfera da Mata Atlântica do Estado do Rio Grande do Sul. Na borda leste destes Campos e objeto desta pesquisa, encontram-se zonas núcleo, de amortecimento e transição(Fig. 4).

LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE PESQUISA

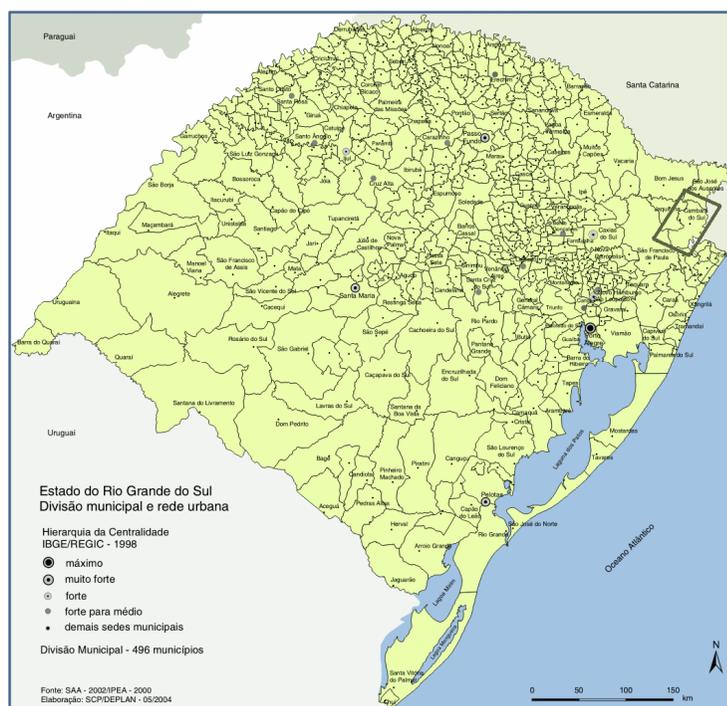


Figura 1. Divisão municipal e urbana do Rio Grande do Sul. Fonte: SAA-2002/IPEA – 2000. O retângulo assinala a região de estudo.

HIPSOMETRIA

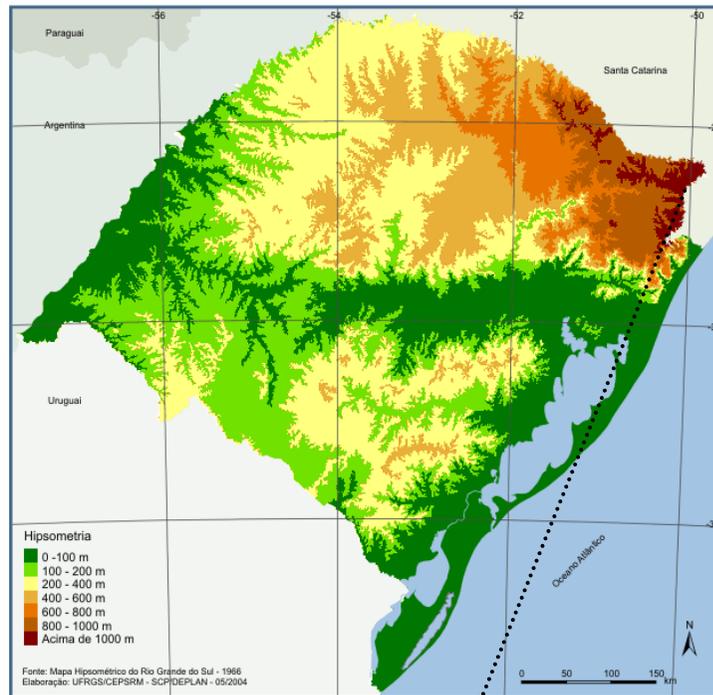


Figura 2a. Rio Grande do Sul, mapa Hipsométrico. Fonte: Mapa Hipsométrico do Rio Grande do Sul, 1966. Elaboração: UFRGS/CEPSRM-SCP/DEPLAN-2004.

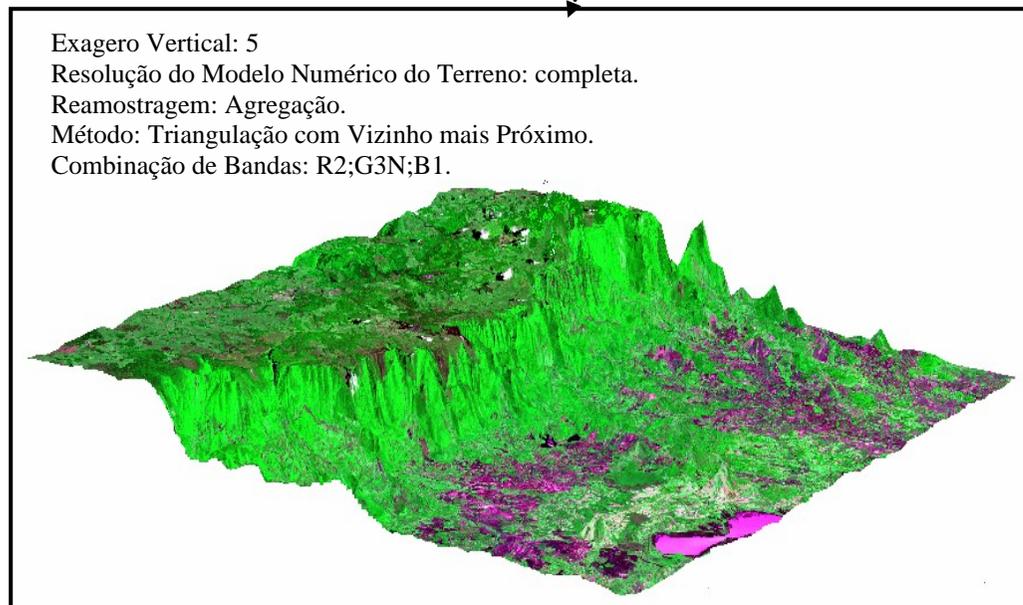


Figura. 2b. Composição colorida R:2;G:3N;B:1, cena ASTER. mostrando a declividade da escarpa.

TEMPERATURA E PRECIPITAÇÃO

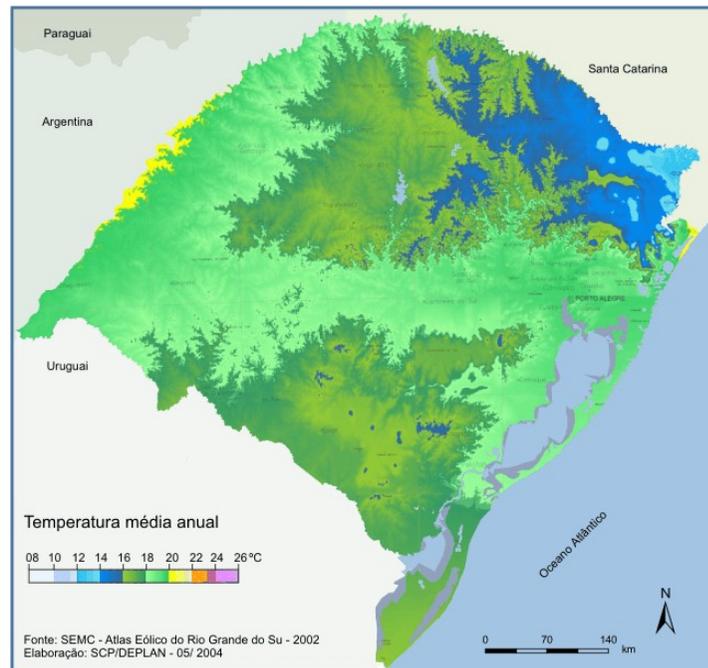


Figura. 3a . Temperatura média anual do Estado do Rio Grande do Sul. Fonte:SEMC – Atlas Eólico do Rio Grande do Sul - 2002.

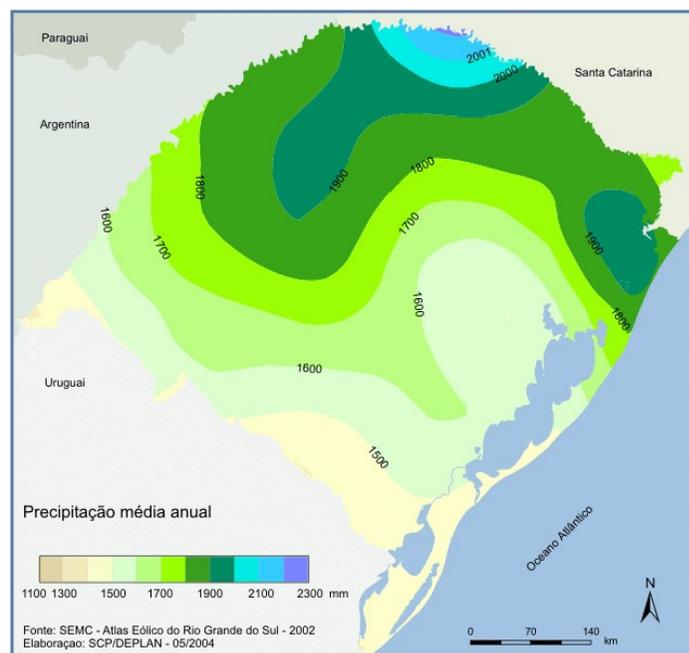


Figura. 3b . Precipitação média anual do Estado do Rio Grande do Sul. Fonte:SEMC – Atlas Eólico do Rio Grande do Sul - 2002.

RESERVA DA BIOSFERA DA MATA ATLÂNTICA

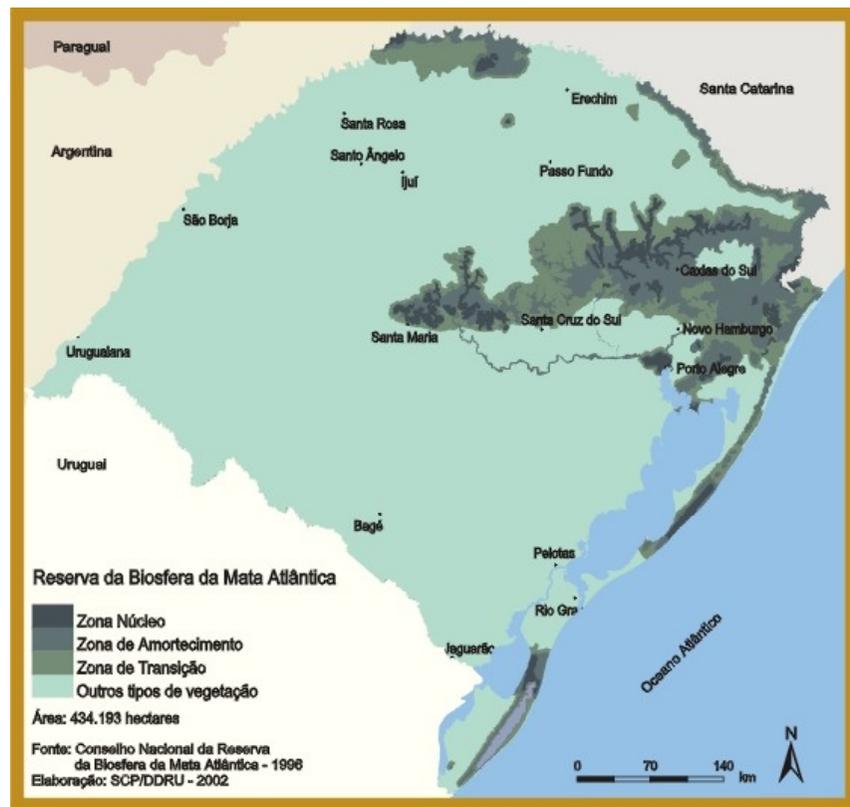


Figura 4 – Reserva da Biosfera da Mata Atlântica no Estado do Rio Grande do Sul. Fonte: Conselho Nacional de Reserva da Biosfera da Mata Atlântica – 1996.

Ainda podem ser observados diversos ambientes onde a vegetação natural encontra-se em satisfatório nível de preservação, localizados nas encostas íngremes dos vales, de difícil acesso e impróprios a práticas agrícolas. Os locais mais preservados acham-se representados por dez unidades de conservação correspondentes a 16.000 ha, sendo a mais importante a do Parque Nacional dos Aparados da Serra, no município de Cambará do Sul.

A região dos Campos de Cima da Serra pertence ao também conhecido Planalto das Araucárias, o menor de todos os ecossistemas brasileiros em extensão. Uma superfície elevada, com altitudes em torno de mil metros, relativamente plana, e levemente inclinada para os quadrantes do oeste. É uma paisagem tipicamente serrana, constituída por coxilhas, banhados, capões e numerosos cursos de água (Bristot, 2001).

O manejo dos campos, ainda hoje, é feito através de queimadas. Esse processo de manejo das pastagens, denominados de “queimadas controladas” se perpetuou durante os últimos duzentos anos sem qualquer interrupção. O fogo elimina as sementes de ervas daninhas e das espécies invasoras como o pinus, porém este fogo elimina sementes de espécies nativas como a da araucária. O Pinheiro Serrano constitui “o dossel” de todos os capões e também das florestas que margeiam as encostas da Serra Geral do Rio Grande do Sul.

A região constituída pelo Planalto das Araucárias nunca foi coberta por uma grande floresta. Na época de sua formação pertencia ao imenso continente chamado Gondwana (Milani, 1997), que se estendia até a atual África (Bristot, 2001). Com a separação dos continentes e com o surgimento do Oceano Atlântico formaram-se muitas falhas na porção oriental dos três Estados do Sul, originando as escarpas dos Aparados da Serra, inicialmente cobertas com lavas. Este marco geológico ocorreu há cerca de 130 milhões de anos e foi segundo Willwock (1998), “*sem dúvida a maior manifestação vulcânica ocorrida sobre um continente que se tem notícia em todos os tempos*”.

Segundo registros em “A Fisionomia do Rio Grande do Sul” (Rambo, 1942), os campos também apresentavam vegetação arborescente diversa. “*Toda a região do quadrante nordeste do Estado era caracterizada pela presença do pinheiro. Na sua distribuição geral, o pinheiro é uma função da acidentação do terreno. A estrutura do pinheiral se manifesta em sua máxima pureza nos matos de regular extensão, que à maneira de grandes capões, acham-se disseminados nas ladeiras das Coxilhas perto do Itaimbezinho. Não levando em conta o escalonamento da vegetação baixa, notamos uma divisão inconfundível em dois andares: o andar inferior, de árvores de meia altura e algumas mais altas, e o andar superior das araucárias*”.

O andar superior é o domínio do pinheiro (araucária). Do ponto de vista biológico, a estrutura do pinheiro está sob a única finalidade de garantir a polinização. A araucária, sendo em sua maioria uma espécie dióica, isto é, desenvolvendo-se as flores masculinas e femininas em indivíduos separados, necessita de fecundação por intermédio do vento e pássaros. Isto torna necessária grandes produções de pólen e aparelhos receptores especiais. A semente do pinheiro não possui dispositivos especiais para intermediar a disseminação,

caindo verticalmente abaixo da copa. Entretanto, o solo dos pinheirais geralmente é duro, de forma que os pinhões são transportados pelas enxurradas, plantando-os ao longo dos cursos de água (Rambo, 1942).

Estas florestas de araucária (Floresta Ombrófila Mista), conforme Leite e Sohn (1986) e Teixeira e Coura Neto (1986), em toda a extensão do Planalto Meridional, estão reduzidas hoje a pouco mais de 10% da sua área original, cujas áreas integram a produção de alimentos, regiões de Florestas Estacionais e grande parte das áreas de Savana Gramíneo-lenhosa. Não obstante a isto, a região das araucárias, no seu conjunto, possui solos pobres para cultivos agrícolas.

Neste contexto, a região dos Campos de Cima da Serra encontra-se frente a uma situação econômica frágil, motivado pelas leis de preservação ambiental (Projeto de lei n 400/94). Segundo depoimento de moradores da região, a proibição de qualquer tipo de queimada está estimulando a venda ou arrendamento de áreas “multadas”, sendo usadas na maioria das vezes, para silvicultura na produção de madeira e resinas (Fig. 5).

Nesta região, que apresenta as menores temperaturas médias anuais no Estado, com ocorrência de neve e geadas no período de inverno e fortes nevoeiros na escarpa que separa estes Campos da Planície Costeira, observa-se que a biodiversidade original sofre processo acentuado de degradação e necessita ser estudada em mais detalhes, viabilizando a implantação de linhas de pesquisa que possibilitam a sua conservação.

Segundo Lima *et al.* (1996), primeiro é preciso fazer o diagnóstico ambiental, quantificando e caracterizando os principais processos de degradação, os elementos e as propriedades que podem ser recuperadas, e os adequados manejos com os recursos potenciais junto com a conservação dos recursos naturais. Somente após este diagnóstico é possível contemplar estratégias para a implementação de um sistema de conservação e regeneração da paisagem, incluindo a mata nativa.



Fig. 5a. – Plantio de *pinus elliottii* em áreas de florestas nativas.



Fig. 5b. – Plantio de *pinus elliottii* sobre áreas de campo.

Figura 5. – Aspectos fitoecológicos da área de estudo.

2.3. O Satélite Terra/Sensor ASTER como Ferramenta para este Trabalho

Já é possível encontrar vários trabalhos em análise, classificação do uso e monitoramento do solo através das técnicas de sensoriamento remoto, aliadas à ferramenta de geoprocessamento. Com o advento da tecnologia de satelização dadas suas características de observação da Terra, desde o fim do século passado e no limiar deste novo, surgiram inúmeras abordagens e soluções de manejo e preservação dos recursos naturais.

Este trabalho insere-se numa proposta inovadora no sentido do sensor utilizado. Aqui a base das informações provenientes de imagens digitais vem do satélite Terra e em especial de seu sensor ASTER. Nesta região de estudo a metodologia empregada tornou-se conhecida através do projeto SINDIMADEIRA (Ducati et al, 1999), que propõe a utilização integrada de técnicas de sensoriamento remoto e sistemas de informação geográficas para o desenvolvimento de um Sistema de Zoneamento Florestal. A metodologia fez uso de imagens do satélite Landsat-5, cujas resoluções espacial e espectral são diferentes deste sensor ASTER, o qual será descrito em detalhe no capítulo 3.

Os resultados de extensão de mapeamento obtidos com os dados ASTER serão comparados com de Ducati et al, 1999, para o segmento correspondente ao município de Cambará do Sul e com as classes comuns. O foco central do presente projeto está na utilização de sensoriamento remoto e geoprocessamento para determinação de áreas de vegetação e uso do solo no extremo leste dos Campos de Cima da Serra, através de imagens orbitais do sensor ASTER.

3. FUNDAMENTAÇÃO TÉCNICA

Os dados multiespectrais da superfície terrestre constituem a base do Sensoriamento Remoto, apesar de existirem disponíveis outras fontes de dados distribuídos espacialmente para uma dada região de interesse. Tais fontes referem-se a mapas topográficos, cadastrais, rodoviários, etc; bem como dados espacializados tais como, por exemplo, mapas geofísicos. A alternativa apresentada pelo uso de imagens de satélite se mostra vantajosa neste sentido, mas deve-se considerar as características das mesmas, tais como nível de detalhamento da cena, resoluções espaciais/espectrais, tamanho de área imageada, para avaliar seus resultados e poder compará-los com outras técnicas de coleta de informação. Frequentemente a perda de detalhe em relação a verdade terrestre é compensada pelo ganho na área coberta e pela economia obtida em custo e tempo na execução do trabalho.

O termo Sensoriamento Remoto está atualmente restrito aos sistemas e técnicas envolvidas na utilização de energia eletromagnética refletida e/ou emitida pelo alvo de interesse, incluindo-se as frequências relativas à região do visível, ao infravermelho (refletido e emitido) e microondas, adquiridas através de aeronaves ou satélites (Rempel, 2000).

Com o avanço tecnológico e o advento dos satélites artificiais nas últimas décadas, a informação coletada de dados territoriais, que eram obtidos em trabalhos diretos em campo ou por reconhecimento aéreo, passou a ter formato quase exclusivamente digital. Neste contexto, desenvolveram-se poderosos métodos de análise e processamento de dados. Com

esta técnica tornou-se possível a observação da Terra inteira, sem as limitações impostas pelos espaços aéreos nacionais e pelo alcance em altitude das plataformas atmosféricas (Ducati, 1999).

3.1 O Processo e Aquisição de Informações

Os processos envolvidos na aquisição de informações através de técnicas de sensoriamento remoto podem ser agrupados em três grandes grupos: coleta de dados, processamento, análise e interpretação. Desta forma, a fim de permitir a obtenção de imagens digitais, várias etapas destes processos ocorrem desde a coleta até posterior interpretação.

O início do processo parte da emissão de radiação eletromagnética por parte de uma fonte de energia. Em sensoriamento remoto a fonte natural utilizada é o Sol. Esta radiação proveniente do Sol se propaga através do espaço irradiando sobre a Terra, a qual deve se propagar pela atmosfera até atingir a superfície terrestre (ou objeto observado). Ao atingir a superfície terrestre sofrerá interações, produzindo uma radiação de retorno. Tal radiação se propagará novamente pela atmosfera atingindo o sensor. O que chega e é captado pelo sensor é a intensidade de energia eletromagnética (radiação) que posteriormente será transformada em um sinal passível de interpretação (Figura 6).

Durante seu caminho através da atmosfera, a radiação solar é atenuada pelos gases e aerossóis que a compõem. Alguns gases (oxigênio, ozônio, vapor de água, gás carbônico) absorvem a energia eletromagnética em determinadas bandas do espectro, de forma que a atmosfera age bloqueando a passagem da radiação nestas regiões do espectro.

O grau de transmissão, ou transmissividade, representa a capacidade das ondas eletromagnéticas de penetrarem na atmosfera. As faixas de comprimento de onda nas quais a atmosfera transmite a radiação são definidas como janelas atmosféricas. Elas têm grande importância, porque possibilitam a reflexão da radiação pela Terra e podem ser aproveitadas pelos sistemas sensores passivos (Figura 7). Além de toda a faixa do visível, as janelas mais importantes localizam-se no infravermelho.

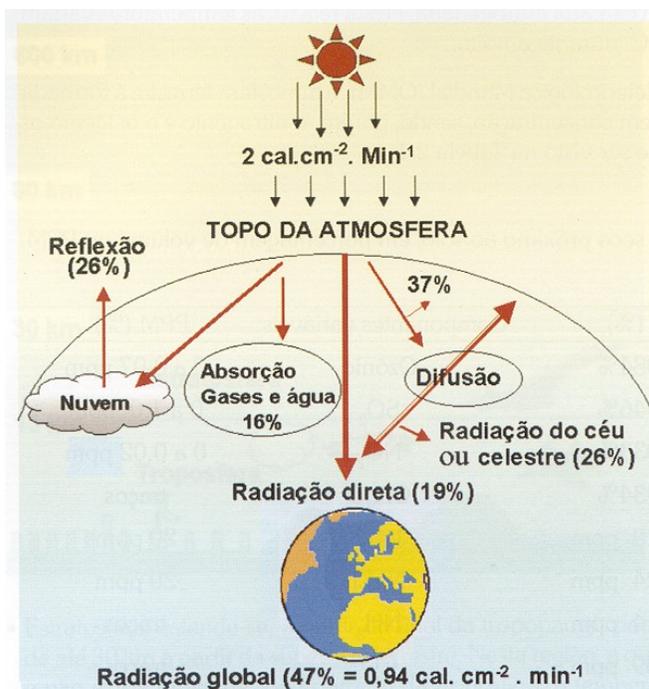


Figura 6. Interação da radiação solar com a atmosfera terrestre. Causas das atenuações da energia solar ao atravessar a atmosfera (Moreira 2003, pág. 30).

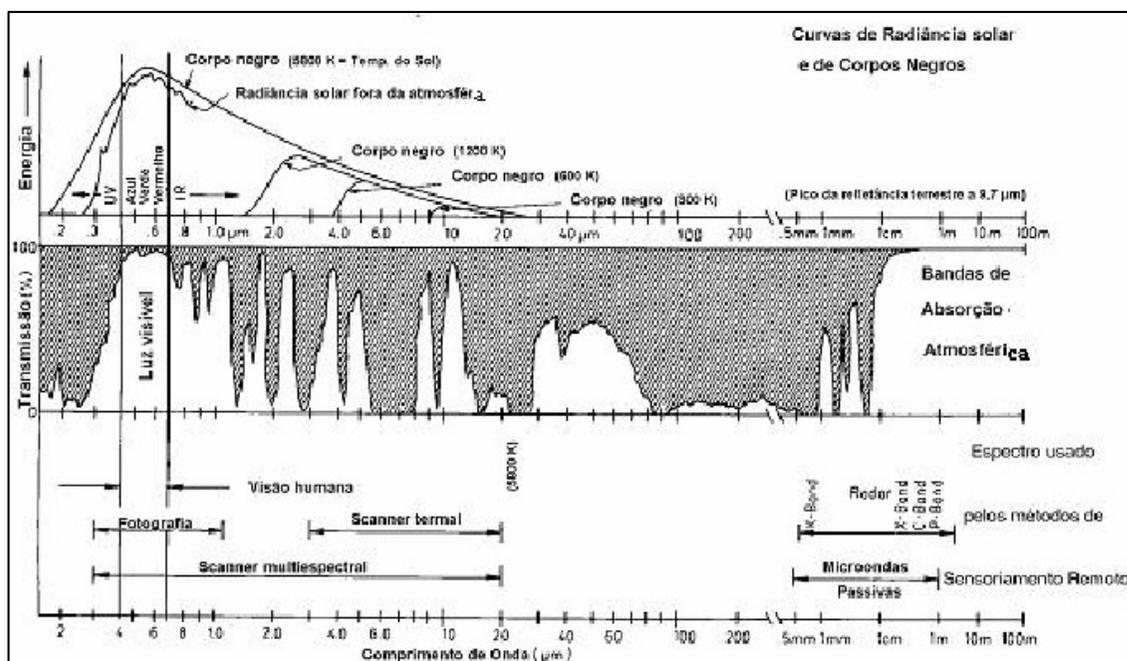


Figura 7. O espectro eletromagnético, a transmissividade atmosférica e os comprimentos de onda usados em sensoriamento remoto (Fonte: Kronberg, 1984, p.4).

Os sinais transformados são então transmitidos à Terra para subsequente análise. Estes sinais, captados pelas fontes terrestres (p. ex: antenas receptoras) são formatados em arquivos compatíveis com computadores para posterior processamento. Isso possibilita maior qualidade, eliminando ruídos e calibrando as imagens através de correções geométricas e radiométricas. Na fase final de interpretação, o usuário destes produtos pode melhorar ainda mais sua análise através de processamento digital. Deste modo, visualmente ou com o auxílio de rotinas computacionais, mediante algoritmos de classificação supervisionada ou não, pode elaborar imagens temáticas, conduzindo a conclusões sobre a natureza ou características dos alvos em estudo.

3.2 Características Espectrais dos Alvos

A determinação da natureza dos alvos pelas técnicas de sensoriamento remoto é baseada no fato de que diferentes materiais são caracterizados por reflectâncias próprias em cada banda do espectro eletromagnético. A reflectância, ou fator de reflexão é proporcional à razão da radiação refletida pela radiação incidente. Quando as respostas espectrais de vários materiais são conhecidas, as propriedades de alvos desconhecidos podem ser determinadas pela comparação das respostas espectrais desses alvos com dados de referência.

A radiação incidente nos alvos pode interagir de diferentes formas. Como regra geral, é necessário que o balanço energético seja respeitado, isto é, a soma da energia refletida, transmitida e absorvida, tem de ser igual à energia incidente. Tanto a absorção, como a transmissão e a reflexão, são seletivas em relação ao comprimento de onda e específicas para cada tipo de material, em função de sua estrutura atômica e molecular (Slater, 1980 adaptado por Rempel, 2000).

A cobertura da superfície terrestre é altamente variada e se caracteriza pelas diferenças dos constituintes que a compõem. Cada um deles responde à radiação eletromagnética de forma particular, o que define diferenças na radiação refletida, a chamada 'resposta espectral', que pode, até um certo ponto, identificar a natureza do material (Ducati et al, 1999).

A determinação e diferenciação da vegetação por métodos de sensoriamento remoto é possível no intervalo de 0,4 a 2,5 μm , já que neste intervalo as folhas são caracterizadas por comportamentos específicos de reflexão, absorção e transmissão. Na região do visível do espectro eletromagnético, o comportamento da reflexão é determinado pela clorofila, cuja absorção encontra-se no intervalo da luz azul (0,4-0,56 μm) e da luz vermelha (0,6-0,7 μm), enquanto reflete no intervalo da luz verde (0,5-0,6 μm). A radiação incidente atravessa, quase sem perda, a cutícula e a epiderme onde as radiações correspondentes ao vermelho e ao azul são absorvidas pelos pigmentos do mesófilo, causando uma reflexão característica baixa nos comprimentos de onda citados. A clorofila absorve a luz verde e por isso a reflectância é maior nos comprimentos de onda correspondente da região visível do espectro, o que é responsável pela cor verde das folhas na visão humana (Figura 8).

Na região do infravermelho (0,7 – 1,3 μm), dependendo da espécie vegetal, a radiação é refletida em uma proporção de 30 a 70 % dos raios incidentes, mesmo que a superfície das folhas e os pigmentos sejam transparentes a estes comprimentos de onda. Entretanto, os sistemas pigmentais das plantas perdem a capacidade de absorver fótons nesse espectro, caracterizado por uma acentuada subida da curva de reflexão. A reflexão neste intervalo é causado pela mudança do índice de refração nas áreas frontais de ar/célula do mesófilo. Nos comprimentos de onda acima de 1,3 μm , o conteúdo de água das folhas influencia mais fortemente a interação com a radiação. O sensor ASTER tem um alcance espectral entre 0,52 – 11,65 μm , cobrindo regiões de reflexão e emissão do espectro eletromagnético. No intervalo das 9 primeiras bandas deste sensor os comprimentos de onda estão entre 0,52 – 2,4 μm ; de forma que não serão objetos deste estudo comportamentos espectrais além deste alcance, conforme se verificará em sua descrição, posteriormente.

As curvas espectrais do solo sem vegetação apresentam, no intervalo espectral correspondente ao azul, valores de reflexão baixos, os quais aumentam continuamente em direção da luz vermelha, do infravermelho próximo e médio (Figura 9). Os parâmetros como tipo de material, granulação e conteúdo de material orgânico, assim como umidade do solo e rugosidade de superfície, influenciam a resposta espectral (Rempel, 2000).

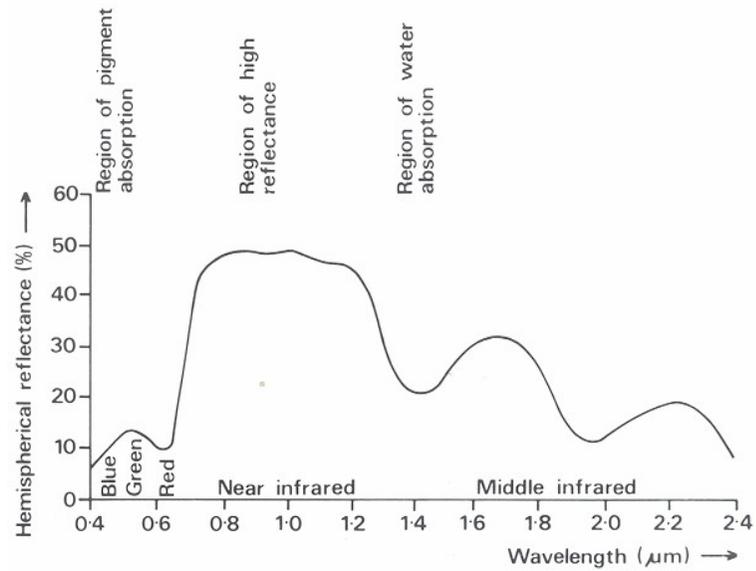


Figura 8. A interação da radiação eletromagnética nos comprimentos de onda no visível, infravermelho próximo e médio com a vegetação (Fonte: Curran, 1988).

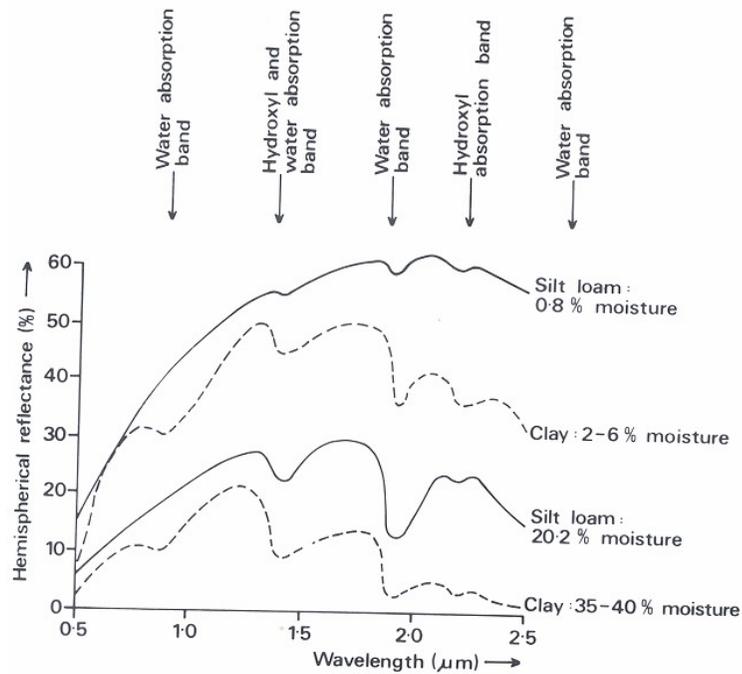


Figura 9. Curvas de reflectância para diferentes texturas, estruturas e misturas de solo (Fonte: Curran, 1988. Modificado de Bowers e Hanks 1965; Hoffer e Johannsen 1969).

Na interação da radiação eletromagnética com a água, a absorção desta radiação ocorre de maneira diferente, na temperatura ambiente, de acordo com o estado físico que a água se encontra (sólido, líquido ou gasoso). A água líquida absorve toda a radiação eletromagnética abaixo de 4,0 μm e acima de 7,0 μm . No intervalo desta faixa espectral, a reflectância da água no estado líquido é pequena, ultrapassando pouco mais de 5% (Moreira, 2003). A absorção da energia solar pelo corpo de água é devida, em parte, às moléculas e elétrons da própria massa de água e, em parte, pelas partículas nela dispersas. Desta forma, uma pequena parcela de energia incidente é refletida pela superfície do corpo de água e outra parte é refletida pelo material que forma o fundo. Os materiais em suspensão formam a parcela mais importante na resposta espectral quando existentes.

Como se observa, as respostas espectrais que caracterizam os principais elementos da superfície terrestre estão localizadas em diferentes faixas do espectro eletromagnético. Desta forma, os sensores são projetados para operar em faixas do espectro óptico em que a resposta espectral dos alvos é significativa.

3.3 Imagens Digitais

Um sistema sensor a bordo de um satélite registra, de forma contínua, a radiação refletida e /ou emitida pela porção de superfície da Terra, que está sendo recoberta, e dentro de um campo de visada instantânea (IFOV). O sinal gerado pode ser registrado por uma antena receptora na Terra, na forma de sinal analógico. Posteriormente este sinal é discretizado e passado para forma digital.

Uma imagem digital é formada por uma matriz bidimensional que define um conjunto de células ou *pixels*. O *pixel* é definido pelas coordenadas espaciais (x,y) que indicam sua localização na cena, sendo que a cada posição (x,y) é atribuído um valor de contador digital (nível de cinza) correspondente ao valor radiométrico registrado pelo sensor ou radiância média emitida, ou refletida, pela área coberta pelo *pixel*.

Em imagens multiespectrais a representação digital é mais complexa. Cada *pixel* com coordenadas espaciais (x,y) é representado por um conjunto de valores de brilho

(níveis de cinza), ou seja, cada *pixel* é representado por um vetor com tantas dimensões quantas forem as bandas espectrais analisadas. Um *pixel* qualquer tem então sua localização definida por uma matriz:

$$pixel\bar{S} = A(x \ y \ \bar{n}) = \begin{bmatrix} x & y & n_1 \\ x & y & n_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ x & y & n_M \end{bmatrix} \quad (2)$$

onde, \bar{n} é a radiância média do *pixel*; M é o número de bandas espectrais; e (x,y) é a coordenada espacial do *pixel* em cada banda.

3.3.1 Atributos e Características das Imagens Digitais

A análise e interpretação de uma imagem exigem a exploração das diferentes maneiras de captar informações da cena, ou seja, a exploração dos atributos da imagem. O atributo pode ser numérico, quando representa uma grandeza física como, por exemplo, a radiância ou temático, quando se tem uma imagem classificada em que o atributo representa o número de identificação associado à classe que está sendo representada.

Os atributos podem ser classificados como espectrais, espaciais, temporais e contextuais. Por atributos espectrais, se referem ao valor da energia refletida ou emitida por cada *pixel* nas bandas espectrais disponíveis. Podem ser a Radiância (L), a Reflectância (ρ) ou contador digital (nível de cinza).

Os atributos espaciais se entendem pelas associações geométricas entre os *pixels* e suas respostas espectrais, como por exemplo: a forma, a textura, a dimensão ou lineamentos. Os atributos de contexto se relacionam com um padrão que ocorre caracteristicamente com outro, por exemplo: grama e vegetação arbórea ocorrem juntas.

Os atributos temporais se referem às variações nos demais atributos de uma imagem em relação ao tempo, isto é a magnitude da variação entre duas datas. A resposta espectral dos alvos pode ser alterada ao longo do tempo por fatores como chuvas, umidade, ação antrópica ou processos naturais.

Na manipulação e análise dos dados de sensoriamento remoto, as propriedades da imagem de maior significado são: o número, localização e abrangência das medições espectrais (bandas espectrais) fornecidas por um sensor específico; a resolução espacial definida pelo tamanho do *pixel*; e a resolução radiométrica do sistema sensor.

A resolução espectral define a caracterização da curva de resposta espectral. A resposta da banda é a média do ponto de comprimento de onda do intervalo. Ela constitui a curva original. Assim a melhor resolução representa um número grande de bandas e um número pequeno de comprimentos de onda por intervalo.

A resolução espacial determina a densidade de *pixels* por unidade de área representada na imagem. Para uma área constante, quanto maior os números de *pixels* forem utilizados para sua representação, maior será a resolução espacial empregada. Desta forma, quanto maior a resolução espacial de uma imagem, maior o grau de detalhamento que se pode obter dos objetos da imagem.

A resolução radiométrica corresponde a capacidade de distinguir alvos com radiâncias diferentes. Esta resolução define o intervalo e o número discernível de valores discretos de brilho (expressos em valores binários ou bits), necessários para representar estes valores de brilho. Os dados com 8 bits de resolução radiométrica tem 256 níveis de brilho. Assim, quanto mais alto a quantidade de níveis de cinza, maior a resolução radiométrica.

A resolução temporal de uma imagem é o tempo transcorrido entre duas passagens sucessivas do satélite sobre o mesmo ponto da Terra. Quanto menor for a resolução temporal do satélite, melhor se poderão acompanhar fenômenos com mudanças rápidas. O satélite utilizado no presente estudo, Terra, com sensor ASTER, tem resolução de 16 dias.

3.3.2 Utilização de Imagens Digitais

3.3.2.1 Processamento de Imagens Digitais

O Processamento digital de imagens envolve a manipulação e interpretação de imagens digitais com o auxílio de computadores, de modo que a entrada e a saída do processo sejam imagens.

A idéia geral do processamento digital de imagens é simples: inicialmente dados são introduzidos em computadores adequados, os quais estão programados para formar uma imagem digital que pode ser visualizada em um monitor ou armazenada para posterior manipulação, a partir da utilização de programas específicos.

As formas possíveis de manipulação de imagens são teoricamente infinitas. Entretanto, de um modo geral, podem ser categorizadas em um ou mais procedimentos que incluem quatro tipos abrangentes de operações computacionais:

- A) Retificação e Restauração de Imagens: operações realizadas para corrigir as distorções e degradações dos dados de uma imagem, com a finalidade de criar uma representação mais fiel da cena.
- B) Realçamento de Imagens: procedimentos aplicados aos dados de uma imagem com o objetivo de melhorar efetivamente a visualização da cena, para subsequente interpretação visual ou digital.
- C) Classificação de Imagens: estas operações têm a finalidade de substituir a análise visual dos dados por técnicas quantitativas de análise automática, visando a identificação das feições presentes na cena.
- D) Combinação de dados: procedimentos utilizados para combinar os dados de uma imagem referente a uma certa área geográfica, com outros conjuntos de dados referenciados geograficamente, para a mesma área.

Atualmente, o grande volume de dados coletados por satélites de recursos naturais e o desenvolvimento da informática, têm estimulado o aparecimento de muitas técnicas de processamento de imagens digitais. É preciso ter bem claro o que se deseja classificar, a fim de escolher o algoritmo que melhor se adapta para a solução de um problema. Dentre os quatro grupos de processamento citados, os itens correspondentes a Retificação/ Restauração e Classificação tem, a seguir, mais um detalhamento, já que estes foram utilizados diretamente no trabalho.

3.3.2.2 Correções de Erros e Registro de Imagens Digitais

O objetivo da restauração e retificação de imagens é a correção das distorções que ocorrem no processo de aquisição da cena. Existem inúmeras operações utilizadas para correção radiométrica e geométrica.

O tipo de correção radiométrica a ser aplicada em uma imagem digital varia com o tipo de sensor utilizado na aquisição da imagem. A radiância proveniente de um objeto da superfície e registrada por um determinado sensor sofre a influência de fatores como variação na iluminação da cena, condições atmosféricas, geometria de visada, características do sistema sensor (registro).

Normalmente, os detectores e sistemas de dados são planejados para produzir uma resposta linear para a radiação espectral incidente. A radiância espectral absoluta da fonte de calibração é conhecida como calibração pré-lançamento, e assume-se que ela seja estável durante toda a vida do sensor. Assim, as fontes de calibração de bordo formam a base para a construção da função de resposta radiométrica, relacionando os valores conhecidos de radiância incidente sobre os detectores, e resultando nos contadores digitais (DN) ou valores de brilho.

A adaptação linear para os dados de calibração é resultante da relação de radiância (L) e contador digital (DN), para cada uma das bandas:

$$\mathbf{DN = G * L + B} \quad (4)$$

onde, DN é o valor do contador digital registrado; G é a inclinação da função de resposta (ganho da banda); L é a radiância espectral registrada (em relação ao intervalo espectral da banda); e B o intercepto da função de resposta (*offset* da banda).

A inclinação e o intercepto da curva de resposta linear radiométrica por banda referem-se ao ganho e *offset* da função de resposta. L_{min} é a radiância espectral que corresponde ao valor de DN = 0. L_{máx} é a máxima radiância requerida para gerar o DN máximo (no caso de ASTER, VNIR e SWIR = 255), ou seja, representa a radiância na qual

ocorre a saturação da banda. O intervalo entre L_{min} e $L_{máx}$ representa o intervalo dinâmico para a banda.

As imagens digitais “brutas” contêm, normalmente, distorções geométricas tão significativas que inviabilizam sua utilização como mapas. As fontes de distorções geométricas são oriundas de: variações na altitude, posição e velocidade da plataforma onde está instalado o sistema sensor; fatores decorrentes da distorção panorâmica, da refração atmosférica, de variações de relevo; e da não linearidade na varredura do IFOV de um sensor. O objetivo da correção geométrica é compensar as variações introduzidas por estes fatores, de modo que a imagem corrigida tenha a integridade geométrica de um mapa.

O registro é feito pelo ajuste de uma imagem a um espaço definido por um sistema de coordenadas de referência. Uma forma comum de registro de imagem é feita pela indicação do sistema de referência, por exemplo, latitude/longitude, nos sistemas de projeção, como o UTM (Richards, 1986). Este procedimento pode ser realizado por uma equação polinomial. Para tanto, são utilizados pontos de controle, sendo estes bem distribuídos em toda a imagem (Richards, 1986; Mather, 1999). A equação estabelece uma relação entre as coordenadas da imagem (linha coluna) e do sistema de referência cartográfico definido. Na Figura 10 se observa a alteração ocorrida na imagem após o registro.

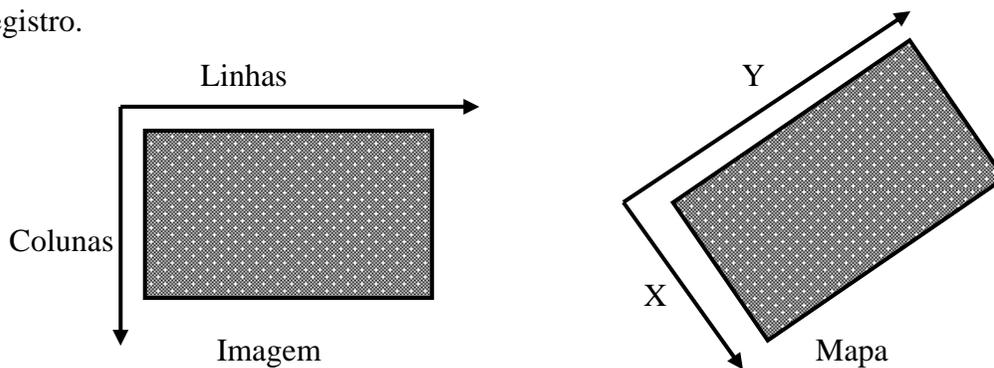


Figura 10. Efeito do registro sobre a imagem.

Ao aplicar uma função polinomial para transpor a imagem para um sistema de coordenadas planas e/ou geográficas, podem ser gerados erros. Os erros são mensurados através da seguinte equação:

$$EMQ = \sqrt{\frac{pt_1^2 + pt_2^2 + \dots + pt_n^2}{n}} \quad (5)$$

onde, EMQ é o erro médio quadrado; pt é a diferença entre as posições do ponto de controle de referência dos pontos na imagem após a transformação; os subscritos 1, 2...n denotam os pontos de controle.

A correção geométrica através de modelagem matemática, em qualquer caso, deve ser precedida de um registro entre bandas, a fim de facilitar o processo de correção.

3.3.2.3 Classificação Digital de Imagens

A identificação de feições em sensoriamento remoto, através de interpretação visual, é efetiva para os aspectos globais geométricos e avaliação geral dos tipos de cobertura da terra (uso da terra). No entanto, sua aplicação é impraticável em nível de *pixel*, a não ser quando apenas o conjunto de *pixels* de interesse seja considerado, e que não haja necessidade de determinações acuradas de estimativa de área ocupada por um tipo específico de cobertura da terra. Além disso, a análise simultânea de um conjunto de bandas é bastante limitada na interpretação visual, o que é agravado pelo fato do intérprete humano ser incapaz de discriminar toda a extensão da resolução radiométrica disponível. Entretanto, através da análise computacional é possível examinar plenamente o aspecto multidimensional dos dados e sua resolução radiométrica.

Na classificação digital, o objetivo geral dos procedimentos é categorizar automaticamente todos os *pixels* de uma determinada imagem, atribuindo a cada *pixel* um rótulo que contenha as informações de um objeto do mundo real (Lillessand e Kieffer, 1987). Dainese (2001), descreve que a classificação digital de imagens orbitais consiste em estabelecer o processo de decisão pelo qual um grupo de *pixels* é definido como pertencente a uma determinada classe ou tema que descreve um ente real.

Para estabelecer o processo de classificação digital primeiramente devem ser escolhidas as feições de interesse, seguido da determinação do método “Padrão de

Comparação”, ou seja, a classificação propriamente dita e o modo de avaliação do mapa gerado (Mather, 1999). Conforme Schowengerdt (1997), tradicionalmente a classificação de uma imagem tem os seguintes procedimentos:

- i) *extração de feições*: transforma a imagem multiespectral em uma imagem com áreas onde as características espectrais ou espaciais idênticas são agrupadas;
- ii) *treinamento*: extração dos valores de cinza de *pixels* utilizados na função de discriminação (processo automático ou não);
- iii) *categorização*: consiste em rotular a cada *pixel* a uma categoria temática.

Dainese (2001) afirmou que a escolha das feições de interesse baseia-se no reconhecimento das respostas espectrais das classes. Dentre os três métodos de classificação digital (Não-supervisionado, Supervisionado e Híbrido), destaca-se a classificação Supervisionada, procedimento freqüente na análise quantitativa de dados de sensoriamento remoto. Este método é executado utilizando-se algoritmos apropriados para designar *pixels* de uma imagem como representativos de um tipo específico de cobertura da terra, ou classe. Vários algoritmos são usados para isto, desde aqueles baseados em modelos de distribuição de probabilidade para classes de interesse, até aqueles que particionam o espaço multiespectral em regiões específicas.

Um dos algoritmos mais difundido nos estudos de sensoriamento remoto é do classificador por Máxima Verossimilhança (MAXVER) que é do tipo supervisionado, pois necessita de amostras de treinamento para adquirir o pacote de estatística (vetor média e a matriz de covariância) que servirá para realizar a classificação das classes.

Segundo Richards (1986), o MAXVER adota a modelagem das classes por uma distribuição de probabilidade no espaço multiespectral, descrita por parâmetros de uma distribuição Gaussiana. Assim, cada classe na área é descrita por uma distribuição de probabilidade normal. Assume-se então que cada alvo dentro da área de estudo, apresenta uma resposta espectral seguindo uma curva de distribuição normal.

Para Moreira (2001), a classificação feita através do MAXVER pode ser descrita em duas etapas:

- i) Treinamento: nesta etapa são selecionadas as amostras em áreas representativas de cada tipo de uso e cobertura do solo. De posse destas amostras são extraídos os parâmetros estatísticos (média e matriz de covariância) para cada classe. Estes parâmetros são usados pelo classificador para criar uma regra de decisão que irá determinar a qual classe pertencerá um dado *pixel* dentro da área de estudo e fora das áreas amostradas.
- ii) Classificação: nesta etapa, é calculada a probabilidade de um dado *pixel* pertencer a cada uma das classes fornecidas ao sistema na fase de treinamento. O *pixel* será associado à classe com maior probabilidade de pertencer dada sua característica.

3.3.3 Avaliação da Exatidão de Mapeamento

Para avaliar a exatidão de mapeamento, segundo Smits *et al.* (1999) são necessários:

- i) Dados de verdade terrestre;
- ii) Esquema de classificação semântica da categoria;
- iii) Esquema e tamanho da amostragem.

Ippoliti-Ramilo (1999), afirma que para quantificar os erros de mapeamento é necessário utilizar técnicas e unidades de amostragem, comparar os dados coletados no campo com os gerados pelo mapeamento e utilizar estatísticas para avaliar a exatidão do mapeamento. Dentre as várias técnicas empregadas para avaliar a exatidão do mapeamento, Smits *et al.* (1999), apresentam quatro categorias, das quais destaca-se a baseada em matriz de confusão.

A técnica baseada em matriz de confusão apresenta os dados na forma de uma distribuição de percentuais de *pixels* classificados de forma correta e incorreta (Smits *et al.*, 1999). Os objetivos dessa técnica, segundo Hay (1988) citado por Dainese (2001) são:

- i) oferecer dados que permitam o ajuste das áreas das classes obtidas por algum tipo de classificação;
- ii) cálculo de parâmetros de exatidão geral da classificação;
- iii) identificação de erros específicos que afetem cada uma das categorias;

Ippoliti-Ramilo (1999), descreve que a estatística mais simples derivada da matriz de erro é a exatidão geral (P_0) que é calculada segundo a equação:

$$P_0 = \frac{\sum_{i=1}^m n_{ii}}{N} \quad (6)$$

onde, N é o número total de unidades amostrais contempladas pela matriz; n_{ii} são os elementos da diagonal principal (número de *pixels* corretamente classificados) e m é o número de categorias presentes na matriz de erro.

Os *pixels* classificados erroneamente são divididos em erros de omissão ou comissão. Os erros de comissão ocorrem quando um ponto é classificado como sendo uma classe A, quando na verdade pertence à outra classe. Erro de omissão é exatamente o contrário, isto é, o ponto pertencente à classe A é classificado como pertencente a uma outra classe (Ippoliti-Ramilo; Smits *et al.*, 1999).

Apesar da ampla utilização dessa medida de exatidão pela comunidade de sensoriamento remoto, Ronsenfield e Fitzpatrick-Lins (1986) ressaltam o fato de que ela utiliza apenas os elementos da diagonal principal da matriz, negligenciando os elementos fora da diagonal. Assim sendo, novas técnicas, principalmente estatísticas, foram desenvolvidas para estimar a exatidão da classificação. Congalton et al (1983) dividem os métodos estatísticos em dois grupos; análise de variância e análise multivariada discreta.

A análise de variância, além de também utilizar apenas os elementos da diagonal da matriz de erro, é uma técnica que requer que os dados tenham uma distribuição normal, e isto não ocorre com os dados de sensoriamento remoto, de natureza discreta e distribuídos em várias categorias. Por outro lado, a análise multivariada discreta não parte do pressuposto da normalidade dos dados e utiliza a matriz de erro, e não apenas os elementos da diagonal principal.

Para avaliar diferentes métodos de comparação entre matrizes de erro com o propósito de melhor avaliar os fatores que afetam a exatidão de uma classificação, Congalton et al. (1983) descreveram uma técnica analítica baseada na análise multivariada discreta

que mede a concordância entre os dados classificados e os dados de referência. Tal técnica, desenvolvida por Cohen é denominada *Kappa*, com seu estimador \hat{K} .

A estatística *Kappa* é um método muito utilizado para avaliar a concordância entre os dados de verdade terrestre e o mapa temático. A grande vantagem da estatística *Kappa* é que no cálculo do seu coeficiente incluem-se todos os elementos da matriz de erro e não somente os elementos da diagonal principal, como no caso da exatidão geral. Para a determinação do valor *Kappa* emprega-se a equação 7 (Congalton & Green, 1998; Ippoliti-Ramilo, 1999; Smits *et al.*, 1999):

$$\hat{K} = \frac{N \sum_{i=1}^r x_{ii} - \sum_{i=1}^r (x_i + x_{+i})}{N^2 - \sum_{i=1}^r (x_i + x_{+i})} \quad (7)$$

onde: \hat{K} é o estimador do coeficiente *Kappa*; r é o número de linhas da matriz quadrada, x_{ii} é o número de observações da linha i e da coluna i respectivamente e N representa o número total de observações. O valor da estatística *Kappa*, determinado através da equação 7 é comparado aos valores contidos na tabela 1, adaptada por Ippoliti-Ramilo (1999). Algumas restrições a esta tabela 1 são feitas pelo fato de ser arbitrária e ter sido criada para fins de diagnóstico clínico.

Tabela 1. Qualidade de Classificação associada aos valores da estatística *Kappa*.

Valor de Kappa	Qualidade do Mapa temático
< 0,00	Péssima
0,00 - 0,20	Ruim
0,20 - 0,40	Razoável
0,40 - 0,60	Boa
0,60 - 0,80	Muito Boa
0,80 - 1,00	Excelente

Fonte; adaptada de Landis & Koch (1977) por Ippoliti-Ramilo (1999).

4. MATERIAL E MÉTODOS

A área de estudo compreende parte dos municípios de Bom Jesus, Jaquirana, São José dos Ausentes, São Francisco de Paula e a quase totalidade do município de Cambará do Sul (Figura 11a), localizados no extremo leste dos Campos de Cima da Serra do Nordeste do Estado do Rio Grande do Sul, inserida entre as latitudes $-28^{\circ}41'S$ e $-29^{\circ}15'S$ e as longitudes $-49^{\circ}54'W$ e $-50^{\circ}18'W$. Esta região caracteriza-se por um intenso processo de inserção de espécies *Eucalyptus sp.* e principalmente a espécie de *Pinus elliotti Engelm var elliottii*. A pesquisa concentrou-se sobre parte da divisa dos Campos de Cima da Serra com a quebra do declive destes Campos com a encosta, cuja área de estudo insere-se no Planalto Meridional conhecido como Planalto das Araucárias.

Foi necessária apenas uma imagem do sensor ASTER para cobrir a área-alvo. Ela corresponde à órbita 4954, de 22 de Novembro de 2000. O produto ASTER escolhido foi a imagem ASTER L1B, já georeferenciada no sistema de projeção UTM, com datum WGS, e radiométricamente corrigida. Neste produto foram utilizadas suas 9 primeiras bandas (1,2,3N,4,5,6,7,8,9) pertencentes aos subsistemas VNIR e SWIR. Além disso, com uso das bandas 3N e 3B, é possível obter o modelo digital de elevação, como informação adicional e compreensão das características topográficas da região (Figura. 11b). Este modelo gerado utiliza as bandas originais L1B, de forma que é necessário rotacioná-lo de acordo com o ângulo de rotação da imagem para fins de aplicação. Da imagem original retirou-se a correspondente região de pesquisa, tal que a área total mapeada tem aproximadamente 1.542 km^2 . Este trabalho foi basicamente dividido em quatro etapas, sendo elas: Recorte e Registro da imagem, Transformações Espectrais, Classificação e Exatidão de Mapeamento.

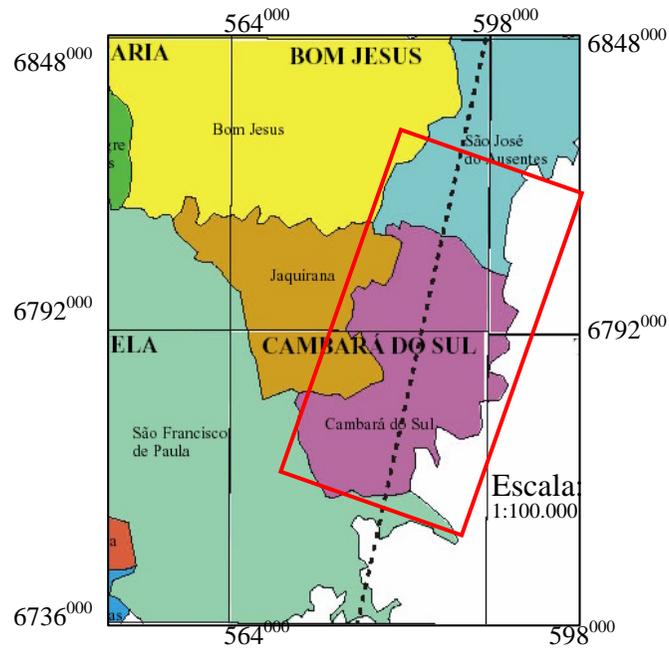


Figura 11a. Mapa de localização da área e divisão municipal. Na parte superior de cada quadrícula consta o nome de cada carta na escala 1:100.000. Em pequenos caracteres estão os nomes dos municípios. (Fonte: Ducati *et al.*, 1999). A área destacada corresponde à região estudada.

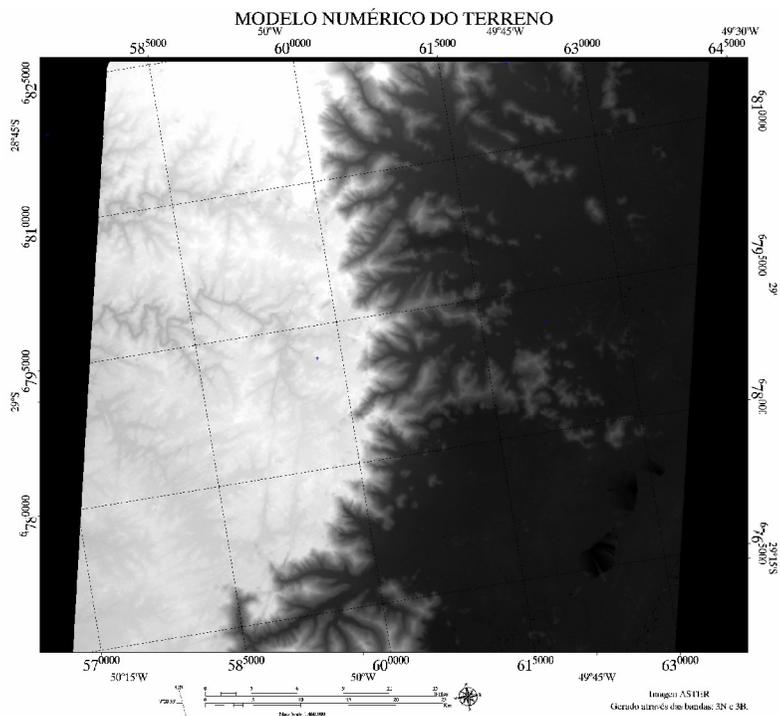


Figura 11b. Modelo Numérico de elevação, resolução espacial de 30 metros, gerado através das bandas 3N e 3B, ainda sem ajuste no ângulo de rotação da imagem original. As altitudes crescem na escala do preto ao branco, que correspondem de 0 até 1300 metros respectivamente.

4.1 Características do Sensor ASTER

O sensor ASTER – *Advanced Spaceborne Emission and Reflection Radiometer* – é um imageador multiespectral a bordo do satélite Terra lançado, em dezembro 1999. Este sensor gera imagens de média resolução espacial e espectral, apresentando três subsistemas de diferentes telescópios: VNIR, SWIR e TIR, os quais fornecem um total de 14 bandas espectrais desde a região do visível ao infravermelho termal do espectro eletromagnético (Fig. 12). O subsistema VNIR tem ainda um telescópio adicional na banda do infravermelho próximo que fornece visão estereoscópica, já que este apresenta diferente ângulo de visada (*backward*) em relação a uma imagem em “Nadir”. A resolução espacial varia com o comprimento de onda e corresponde aos diferentes subsistemas. Cada cena ASTER tem dimensão de 60 por 60 quilômetros.

Terra é o primeiro de uma série de satélites “multi-instrumentos” formando o Sistema de Observação da Terra (EOS). O EOS consiste de componentes de pesquisa e sistema de dados como suporte para uma série temporal de observações globais na superfície terrestre, biosfera, atmosfera e oceanos, por satélites com órbita-polar e baixa inclinação, sendo capaz de fornecer uma compreensão da Terra como um sistema integrado. O satélite Terra está em uma órbita síncrona-solar, 30 minutos atrás do satélite Landsat ETM+, fazendo medidas da superfície às 10h e 30 minutos da manhã, hora solar local, retornando a mesma órbita com frequência de 16 dias. Viajando a altitude média de 705 quilômetros, apresenta parâmetros de órbita iguais ao Landsat 7, com exceção da hora local.

O satélite Terra opera nesta órbita síncrona-solar com inclinação de 98,2 graus, período orbital de 98,88 minutos e hora do cruzamento na descendente. Sua velocidade com relação ao solo é de 6,7 km/s, apresentando distância entre órbitas adjacentes de 172 km, e com ciclo de recorrência de 233 órbitas. O sensor ASTER, como um instrumento de alta resolução espacial neste satélite, atua como “*zoom*” em relação a todos os outros instrumentos. Por dia, adquire-se o correspondente a 650 cenas, as quais são processadas a nível L1A – sem a aplicação das correção geométrica e radiométrica – e destas, 150 são processadas a nível L1B – com aplicação das correções . As cenas são transferidas ao

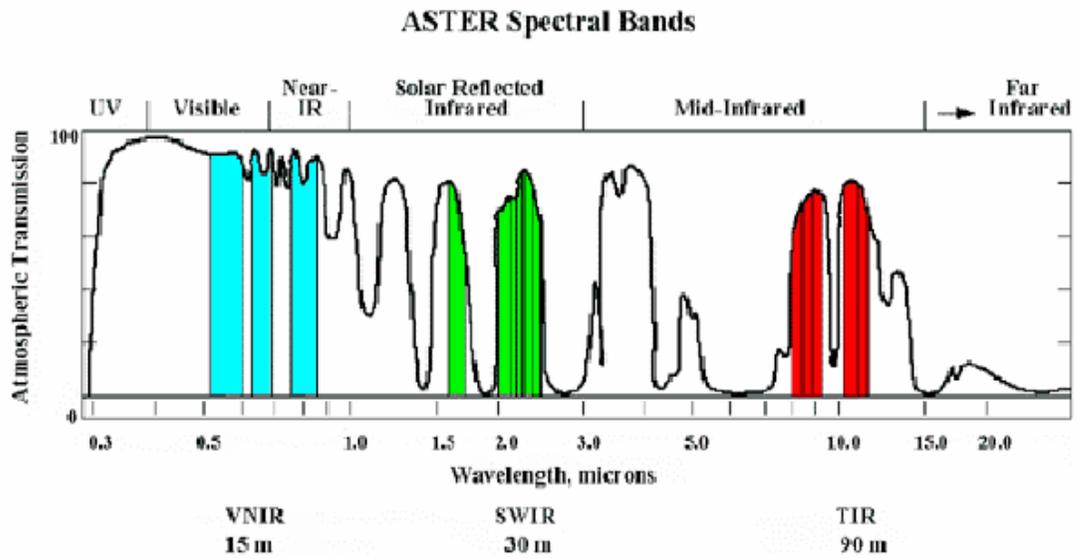


Figura 12a. Região espectral do sensor ASTER, com suas 14 bandas.

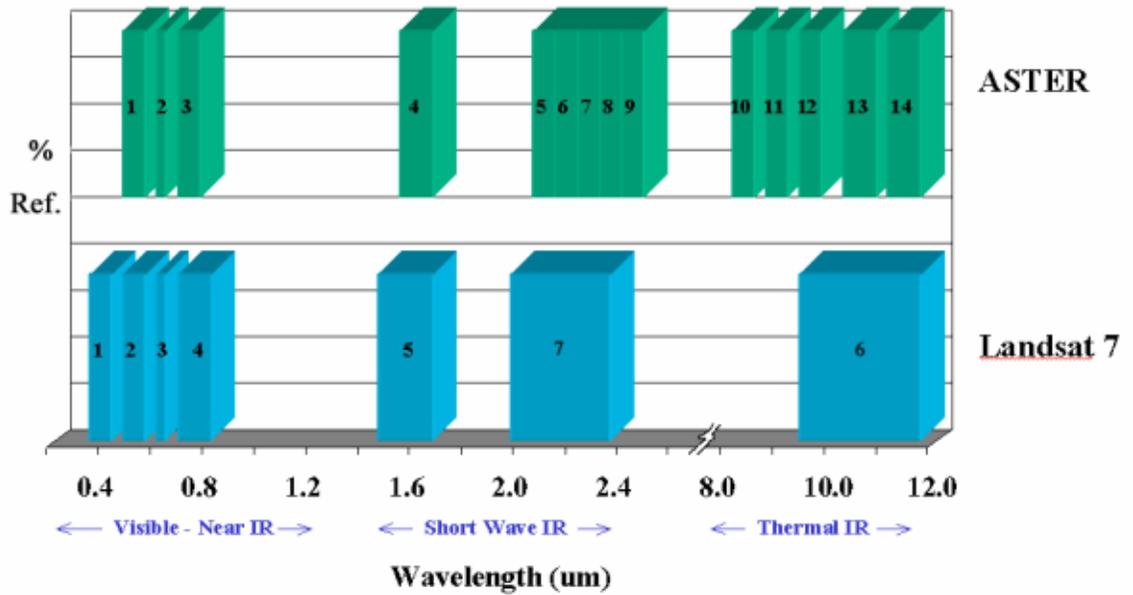


Figura 12b. Comparação das bandas espectrais do ASTER e Landsat TM. “% Ref.” é a reflectância percentual.

arquivo EOSDIS e ao EDCDAAC – *Eros Data Center Distributed Active Archive Center* – para arquivo, estocagem, distribuição e processamento em dados de alto nível. Todos estes produtos são armazenados no formato HDF (*Hierarchical Data Format*).

O instrumento ASTER consiste de três subsistemas separados. Cada subsistema opera em diferente região espectral tendo seus telescópios próprios. O subsistema VNIR (Visível e Infravermelho Próximo) apresenta três bandas com resolução espacial de 15 metros, e um telescópio adicional com capacidade estereoscópica; o SWIR (Infravermelho Médio) conta com 6 bandas em resolução espacial de 30 metros; e o TIR (Infravermelho Termal) tem 5 bandas com resolução espacial de 90 metros. As características dos subsistemas são mostradas na Tabela 2.

A operação é por um tempo limitado, em partes do dia e noite de uma órbita. A configuração completa (todas as bandas em *stereo plus*) coleta dados numa média de 8 minutos por órbita. Configuração reduzida (bandas limitadas, ganhos diferentes, etc), pode ser implementada como solicitação por investigadores.

Tabela 2. Características dos subsistemas ASTER.

Subsistema	Banda N°	Alcance Espectral (μm)	Comprimento de onda médio (μm)	Resolução Espacial (m)	Resolução Radiométrica (bits)
VNIR	1	0.52-0.60	0.5560	15	8
	2	0.63 - 0.69	0.6610		
	3N	0.78 - 0.86	0.8070		
	3B	0.78 - 0.86	0.8040		
SWIR	4	1.60 - 1.70	1.6560	30	8
	5	2.145 - 2.185	2.1670		
	6	2.185 - 2.225	2.2090		
	7	2.235 – 2.285	2.2620		
	8	2.295 – 2.365	2.3360		
	9	2.360 – 2.430	2.4000		
TIR	10	8.125 – 8.475	8.2910	90	12
	11	8.475 – 8.825	8.6340		
	12	8.925 – 9.275	9.0750		
	13	10.25 – 10.95	10.6570		
	14	10.95 – 11.65	11.3180		

4.1.1 Produtos ASTER

O instrumento ASTER fornece dois grupos de produtos: os dados de Nível L1 e os produtos de Alto-Nível. No primeiro grupo há dois tipos de dados de Nível L1, o Nível 1A (L1A) e o Nível 1B (L1B).

Os dados L1A são formalmente definidos como dados instrumentais não processados, reconstruídos e de resolução completa. O conjunto dos dados ASTER L1A consiste dos dados da imagem, os coeficientes radiométricos, os coeficientes geométricos e outros dados auxiliares sem a aplicação destes coeficientes na imagem, mantendo os valores originais. Estes coeficientes para calibração radiométrica e reamostragem geométrica são aplicados nos dados L1B.

Todas as imagens adquiridas do Nível 0 são processadas ao Nível L1A. Devido a limitações para armazenamento destes dados a bordo do satélite, apenas 650 cenas por dia são adquiridas pelo instrumento ASTER. O máximo de 310 cenas por dia é processado ao Nível L1B baseando-se em dados da cobertura de nuvens.

O produto ASTER L1A tem os coeficientes de correção geométrica e calibração radiométrica anexados, mas não aplicados. Estes coeficientes incluem correção da paralaxe SWIR bem como os registros entre e dentro dos telescópios. O erro de paralaxe SWIR é causado pela “saída” (*offset*) no alinhamento do detector ao longo do caminho e depende da distância entre o satélite e a superfície da terra observada. Para as bandas SWIR a correção da paralaxe é realizada na imagem com técnicas de combinação (*matching*) ou dados de modelos numéricos do terreno, (dependendo da cobertura de nuvens). Os coeficientes de calibração radiométrica, consistindo de informações de *offset* e informações de suscetibilidade, são gerados de uma base de dados para todos os detectores, atualizados periodicamente. A correção geométrica é uma transformação de coordenadas realizadas em cada uma das bandas.

O produto ASTER L1B é derivado dos dados L1A, cujos coeficientes geométricos e radiométricos são aplicados. Todos estes dados são armazenados junto com um Metadata

no arquivo HDF que inclui também registro dos subsistemas VNIR, SWIR e TIR. Além disso, para o subsistema SWIR, o erro de paralaxe devido à posição espacial é corrigido.

Tabela 3. Dados de produtos padrão de ASTER Alto-Nível. Adaptado de Abrams, 1999.

Prod. ID	Nível	Nome do Parâmetro	Modo de Produção	Unidade	Acurácia Absoluta	Acurácia Relativa	Resol. Horizon. (m)
AST06	2	Realce por Decorrelação-VNIR	rotina	nenhuma	N/A	N/A	15
AST06	2	Realce por Decorrelação-SWIR	rotina	nenhuma	N/A	N/A	30
AST06	2	Realce por Decorrelação-TIR	rotina	nenhuma	N/A	N/A	90
AST04	2	Temperatura de Brilho	requerer	graus C	1-2 C	0.3 C	90
AST07	2	Superfície de Reflectância	requerer	nenhuma	4%	1%	15, 30
AST09	2	Superfície de Radiância -VNIR, SWIR	requerer	W/m ² /sr/μm	2%	1%	15, 30
AST09	2	Superfície de Radiância-TIR	requerer	W/m ² /sr/μm	2%	1%	90
AST05	2	Superfície de Emissividade	requerer	nenhuma	0.05-0.1	0.005	90
AST08	2	Superfície de Temperatura Cinética	requerer	graus K	1-4 K	0.3 K	90
AST13	2	Superfície Polar e Classificação de nuvens	requerer	nenhuma	3%	3%	15, 30, 90
AST14	4	Modelo Digital de Elevação (DEM)	requerer	m	>= 7 m	>= 10 m	30

A imagem L1B é projetada sobre um mapa rotacionado em todas as resoluções do instrumento. Este nível define o centro de cena como o centro geodésico da cena obtida dos atributos L1A. A definição do centro de cena em L1B é o centro verdadeiro em um sistema de coordenadas, ou seja, não é o mesmo do L1A. Estes dados L1B são gerados através de um sistema de projeção e método de reamostragem. A base da projeção é sempre em UTM (*Universal Transverse Mercator*) em termos de orientação, usando a Convolução Cúbica

como reamostragem. Existem outros métodos de projeção e reamostragem disponíveis que podem ser requeridos (Tabela 4).

Tabela 4. Métodos de reamostragem e projeção disponíveis para produção dos produtos L1B. Adaptado de Abrams, 1999.

Método de Reamostragem	Sistema de Projeção
<i>Nearest Neighbor (NN)</i>	<i>Geographic (EQUIRECT)</i>
<i>Cubic Convolution (CC)</i>	<i>Lambert Conformal Conic (LAMCC)</i>
<i>Bi-Linear (BL)</i>	<i>Space Oblique Mercator (SOM)</i>
	<i>Polar Stereographic (PS)</i>
	<i>Universal Transverse Mercator (UTM)</i>

Os produtos ASTER de Alto-Nível são resultado de processamento nas imagens de Níveis L1A e L1B, podendo ser adquiridos direto no banco de imagens do EOS quando disponíveis (modo rotina) ou através de pedidos especiais (modo requerer) fornecendo os dados relacionados ao produto desejado. Dependendo do produto este está ou não disponíveis no modo de rotina. Além disso, alguns deles são produzidos exclusivamente em determinados subsistemas. A Tabela 3 acima lista cada um dos dados de produtos de Alto-Nível e algumas de suas características básicas.

4.1.2 Parâmetros Radiométricos

Os dados de Nível 1B estão em termos de escala de radiância. Para converter de Contador Digital para radiância do sensor, o coeficiente de unidade de conversão (definido como radiância por 1 Contador Digital - DN) é usado. A Radiância (radiância espectral) é expressa em unidades de $W/(m^2 \text{ sr } \mu\text{m})$. A relação entre os valores de DN e radiâncias é:

- i) O valor de DN = 0 é alocado a um pixel fictício.
- ii) O valor de DN = 1 é alocado à radiância nula.
- iii) O valor de DN = 254 é alocado ao máximo de radiância para as bandas do VNIR e SWIR.
- iv) O valor de DN = 4094 é alocado ao máximo de radiância para as bandas do TIR.
- v) O valor de DN = 255 é alocado aos pixels saturados nas bandas dos subsistemas VNIR e SWIR.
- vi) O valor de DN = 4095 é alocado aos pixels saturados das bandas do TIR.

O máximo de radiâncias depende das posições espectrais das bandas e do ganho, como se vê na Tabela 5. A radiância pode ser obtida dos valores de contador digital (DN) e do “coeficiente de unidade de conversão” (tabela 6), através da relação de :

$$\text{Radiância} = (\text{DN} - 1) \times \text{Coeficiente de Unidade de Conversão}^* \quad (1)$$

Tabela 5. Máximo de radiância para todas as bandas ASTER em todos os ganhos (Abrams, 1999).

Nº da Banda	Radiância Máxima (W/(m ² sr um))			
	Alto Ganho	Ganho Normal	Baixo Ganho 1	Baixo Ganho 2
1	170.8	427	569	N/A
2	179.0	358	477	
3N	106.8	218	290	
3B	106.8	218	290	
4	27.5	55.0	73.3	73.3
5	8.8	17.6	23.4	103.5
6	7.9	15.8	21.0	98.7
7	7.55	15.1	20.1	83.8
8	5.27	10.55	14.06	62.0
9	4.02	8.04	10.72	67.0
10	N/A	28.17	N/A	N/A
11		27.75		
12		26.97		
13		23.30		
14		21.38		

Tabela 6. Coeficientes de conversão calculados (Abrams, 1999).

Nº da Banda	* Coeficiente (W/(m ² sr um)/DN)			
	Alto Ganho	Ganho Normal	Baixo Ganho 1	Baixo Ganho 2
1	0.676	1.688	2.25	N/A
2	0.708	1.415	1.89	
3N	0.423	0.862	1.15	
3B	0.423	0.862	1.15	
4	0.1087	0.2174	0.290	0.290
5	0.0348	0.0696	0.0925	0.409
6	0.0313	0.0625	0.0830	0.390
7	0.0299	0.0597	0.0795	0.332
8	0.0209	0.0417	0.0556	0.245
9	0.0159	0.0318	0.0424	0.265
10	N/A	6.822 x 10 ⁻³	N/A	N/A
11		6.780 x 10 ⁻³		
12		6.590 x 10 ⁻³		
13		5.693 x 10 ⁻³		
14		5.225 x 10 ⁻³		

4.2 Aquisição e Análise dos Dados

Quando se trabalha com sensoriamento remoto aplicado é necessário utilizar além dos dados orbitais, dados de campo, cartas oficiais, e materiais de apoio, viabilizando a produção de cartas-imagem e mapas com qualidade e capacidade de serem utilizados para inúmeras finalidades.

4.2.1 Dados Orbitais

Nesta pesquisa o objetivo do trabalho está focado na interpretação e análise destes dados orbitais e não nos processos e instrumentação do satélite em si. É importante esclarecer que foram empregados, do sensoriamento remoto, dados adquiridos através de sistemas formadores de imagens. Imagens estas do tipo em que todos os *pixels* são adquiridos por varredura, que neste caso, corresponde a imagens do sensor ASTER do satélite Terra.

A região dos Campos de Cima da Serra apresenta forte presença de neblina ou cerração, freqüentemente nas primeiras horas da manhã. Esta característica pode dificultar a obtenção de imagens claras e sem nuvens por longos períodos, havendo uma ressonância entre a passagem do satélite a cada 16 dias e a presença da nebulosidade (Ducati *et al.*, 1999). A imagem do sensor ASTER utilizada, que cobre toda a área da pesquisa, também tem algum percentual de cobertura de nuvem devido a este fenômeno.

As características do sensor ASTER vistas na Tabela 2, mostram uma gama de bandas com diferentes resoluções espectrais e espaciais ainda a serem exploradas pelo meio científico, dado o tempo desde o início da disponibilidade das suas imagens (a partir de 2000). Neste contexto a investigação procederá usando os métodos de classificação supervisionada MAXVER em três grupos:

- i) **VNIR:** 3 bandas com 15 metros de resolução espacial (1,2,3N).
- ii) **SWIR:** 6 bandas com 30 metros de resolução espacial (4,5,6,7,8,9).
- iii) **(VNIR + SWIR):** 9 bandas com 30 metros de resolução espacial (1,2,3N,4,5,6,7,8,9). As bandas 1, 2, 3N sofreram redimensionalização pelo

método de vizinho mais próximo para adquirirem a mesma resolução espacial do subsistema SWIR.

4.2.2 Dados de Campo e Cartas Oficiais

Trabalhos em campo foram efetuados nas regiões onde, nas imagens de satélite, havia indicação de existência de maciços de mata nativa, mata de araucária, pinus com diferentes idades e práticas de manejo diferenciado e eucalipto, além de áreas de solo exposto, cultivos agrícolas (principalmente maçã, com exceção das florestas exóticas) e desmatamento. A diferença de tempo entre a imagem e a primeira expedição data de 2 anos e 8 meses. Estes pontos sobre a superfície terrestre foram executados levantamento de coordenadas através do uso do GPS Magellan – Promark, medindo além destas classes de interesse, pontos para o refinamento da imagem ASTER L1B georeferenciada.

Executaram-se duas expedições oficiais nos períodos de 14 a 16 de Julho e 18 a 22 de Novembro de 2003, as quais forneceram subsídios na avaliação do produto ASTER L1B (Anexo I) e sua capacidade de identificação de classes de vegetação e uso do solo através de algoritmos de classificação. Em relação à qualidade de georeferenciamento do produto ASTER L1B, pode-se concluir que usando 30 pontos de alta precisão medidos em campo, em média, houve uma variação destes pontos sobre a imagem de:

variação da latitude: ΔX (m) = - 45,6159 m (\pm 23,2225 m)

variação da longitude: ΔY (m) = 0,9485 m (\pm 16,1965 m)

nota-se grandes desvios da média indicados entre parêntesis.

Também foram usadas cartas oficiais da Diretoria do Serviço Geográfico do Ministério da Defesa do Exército. As cartas utilizadas a escala 1:50.000 foram São Francisco de Paula, Cambará do Sul, Vila Santana, Jaquirana e São José dos Ausentes. A correção geométrica da imagem foi executada através de GPS com exposições entre 10 e 15 minutos para alta precisão, de modo que estas cartas oficiais apenas forneceram localizações nas missões em campo.

Em apoio às atividades em campo e aos dados orbitais, este projeto recebeu também informações diretas sobre muitos maciços florestais, desmatamentos e queimadas,

fornecidos pelo IBAMA (diretamente pelo diretor do Parque, no Itaimbezinho), por algumas empresas proprietárias de áreas de reflorestamento (p. ex: na pessoa do gerente da reflorestadora Unidos), no trabalho de Ducati et al (1999) ou por depoimentos de pequenos proprietários. Somado a isso também contou-se com farto material de mapeamento e trabalhos de campo realizados em outras missões do Centro de Pesquisas em Sensoriamento Remoto e Meteorologia da UFRGS.

4.3. Processamento e Pré-classificação

Após ler a imagem, através do aplicativo ENVI 3.5 (<http://www.envi.com.br/>), procedeu-se ao primeiro recorte desta imagem retirando a região da planície costeira. Este recorte teve como objetivo reduzir o tamanho dos arquivos selecionando apenas a área de interesse, de modo a tornar mais rápidos os processamentos das imagens, diminuindo o espaço ocupado no disco rígido do computador e eliminando áreas da Planície Costeira e parte da encosta cujas classes não seriam amostradas neste trabalho.

O registro da imagem realizou-se com auxílio dos pontos medidos em trabalho de campo a partir do equipamento de GPS, cujos valores foram posteriormente “amarrados” (ajustados) a um sistema preciso de calibração da antena do Departamento de Geodésia da UFRGS. Dos 34 pontos de alta precisão (exposições de 10 a 15 minutos individualmente) foram utilizados 30 deles. Escolheram-se os pontos de controle (entroncamentos de estradas, junção de drenagem, etc) que puderam ser também identificados nos dois subsistemas do ASTER L1B. Nestes pontos de controle obtiveram-se as coordenadas geográficas associadas aos pixels identificados na imagem. Neste processo de georeferenciamento da imagem foi aplicado o modelo polinomial de 1º grau com reamostragem de vizinho mais próximo. O erro médio quadrático (EQM) obtido com 30 pontos de controle resultou em excelentes índices de RMS (Tabela 7).

Tabela 7. Erro médio quadrático na correção geométrica de VNIR e SWIR.

SUBSISTEMA	RMS (pixels)	VALOR (m)
VNIR	0,758	11,37
SWIR	0,379	11,37

A igualdade nos erros encontrados nos dois subsistemas, VNIR e SWIR, é esperada, devendo-se ao fato que as duas imagens foram recortadas de forma a terem iguais valores de coordenadas geográficas em seus vértices. Desta forma, ao definir a localização (X,Y) de um ponto sobre a imagem em VNIR, a qual tem o dobro de linhas e colunas do que a imagem SWIR, pois o tamanho de pixel é de 15m (VNIR) no lugar de 30m (SWIR), tomaram-se valores de linha e coluna pela metade, definindo-se então, sua localização na imagem SWIR.

Após o registro da imagem, a mesma foi novamente recortada eliminando a encosta sobre a escarpa, permitindo ter apenas a cena que pertence aos Campos (Figuras 13, 14 e 15). Este procedimento foi executado de forma manual baseando-se no forte contraste de relevo entre o limite do campo e da escarpa. Na fase posterior os dados de contador digital foram transformados para valores físicos de radiância.

Para realizar a transformação dos valores de contador digital para radiância foi preciso levar em conta os dados de ganho e *offset* em cada banda. Neste caso, o produto ASTER L1B tem um meta arquivo onde estão contidos uma gama de informações referentes às medidas, calibrações e dados dos telescópios. Assim, aplicando a equação (1) em cada banda, ajustou-se seu valor para o máximo de radiância na sua faixa espectral. Os coeficientes de unidade de conversão escolhidos foram aqueles (Tabela 6) em cujo meta arquivo teve-se a informação de qual ganho por banda a imagem foi gerada. Desta forma, a radiância máxima por banda correspondeu aos valores tabelados (Tabela 5).

A partir daí novamente as bandas são agrupadas (*stacking*) em arquivos com mesma resolução espacial, isto é, um grupo com as bandas 1,2,3N e outro com as bandas 4,5,6,7,8,9. Além disso, outro grupo foi formado, também com resolução de 30 metros, a partir da redimensionalização das bandas 1,2,3N, contendo as bandas 1,2,3N,4,5,6,7,8,9.

Visando aprimorar a análise digital foi realizada, primeiramente, uma classificação não supervisionada, Isodata, a qual define aglomerados de *pixels* que caracterizam respostas espectrais semelhantes. Este procedimento foi de uma rotina de teste apenas para verificação da coincidência entre a análise visual e uma classificação não supervisionada. Desta forma, com base em amostras coletadas na tela do visualizador de imagens e

confirmadas em observação *in loco* por ocasião do trabalho de campo, ou seja, de observação visual direta dos alvos da superfície terrestre, tornou-se possível definir amostras de treinamento para a classificação supervisionada MAXVER.

4.4 Classificação Supervisionada

O conhecimento da área de estudo proporcionou a definição de treze classes para classificação das áreas de vegetação e uso do solo (Figura 16 a-b). As idades referem-se quando das missões em campo:

- i) pinus com manejo diferenciado (área de floresta de pinus em que ocorre o desbaste e raleio sistemático; amostras de pinus com cerca de 20 de idade); (Figura 17).
- ii) pinus jovem (área de pinus com predominância ainda da resposta espectral do solo, com pequenas variações de brilho em relação ao mesmo; amostras com cerca de 8 anos de idade);
- iii) pinus adulto (florestas de pinus consolidadas com espécies adultas; amostras com cerca de 20 anos de idade sem o manejo diferenciado: raleio e desbaste);
- iv) pinus velho (florestas de pinus com resposta espectral com baixo valor de brilho, mais escuras; amostras com cerca de 30 anos de idade);
- v) eucalipto (florestas de eucalipto em pequenos maciços; amostras de qualquer espécie de eucalipto em florestas adultas);
- vi) mata nativa (área ocupada por mata nativa, em qualquer estágio de desenvolvimento, com exceção das florestas com predomínio de araucárias);
- vii) área de plantio (área ocupada por cultivos agrícolas exceto florestas de pinus e eucalipto; predomínio de pomares de maçã);
- viii) solo exposto (área que estava com solo desnudo);
- ix) nuvem;
- x) sombra (define as áreas de sombra de nuvem e toda a parte não imageada – fora da cena);
- xi) campo;
- xii) mata de araucária (Floresta Ombrófila Mista);
- xiii) área de queimada (locais com cobertura vegetal queimada; campo e taludes de florestas com sinais de queimada recente).

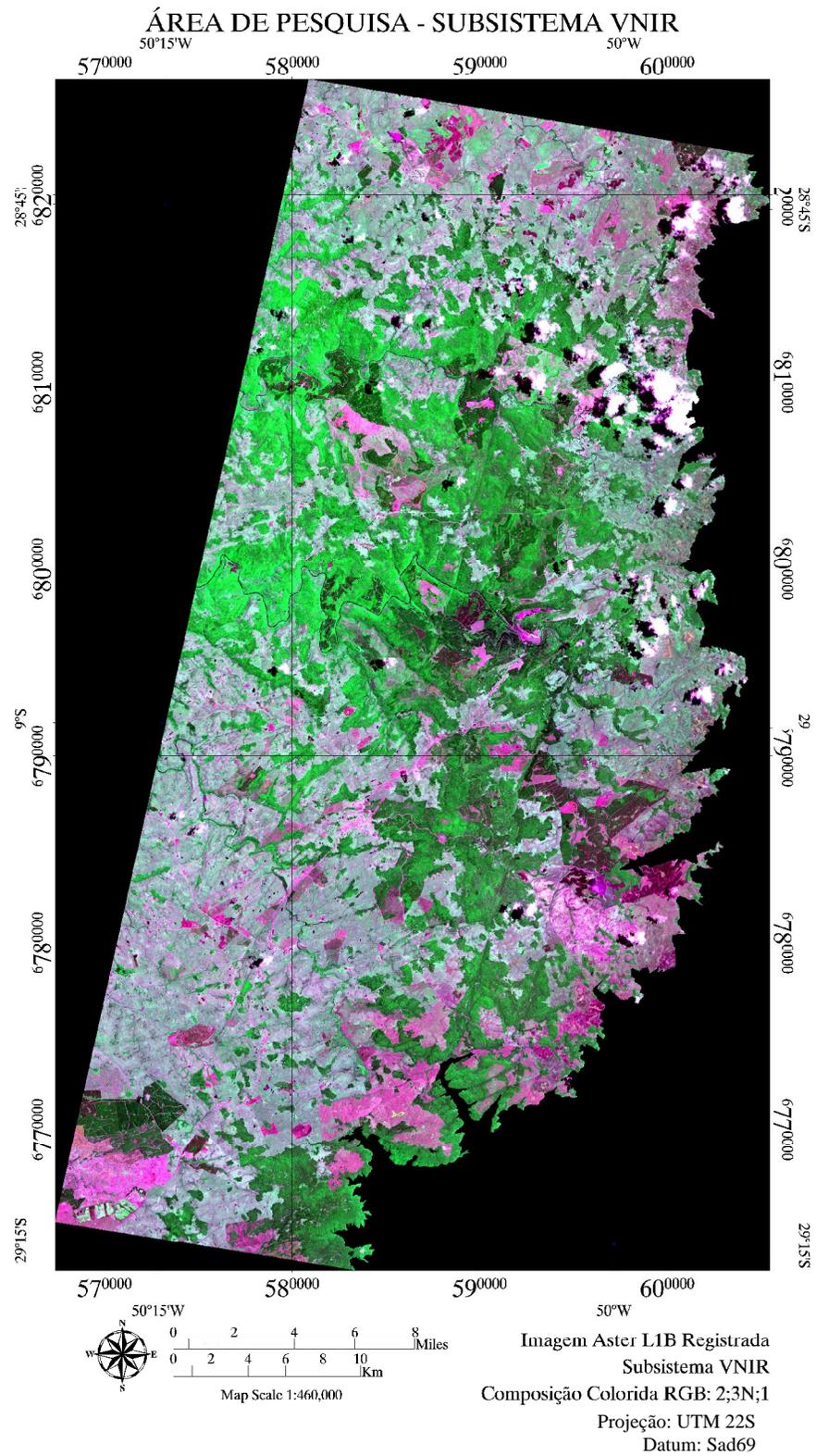


Figura 13. Imagem recortada da cena ASTER L1B, subsistema VNIR.

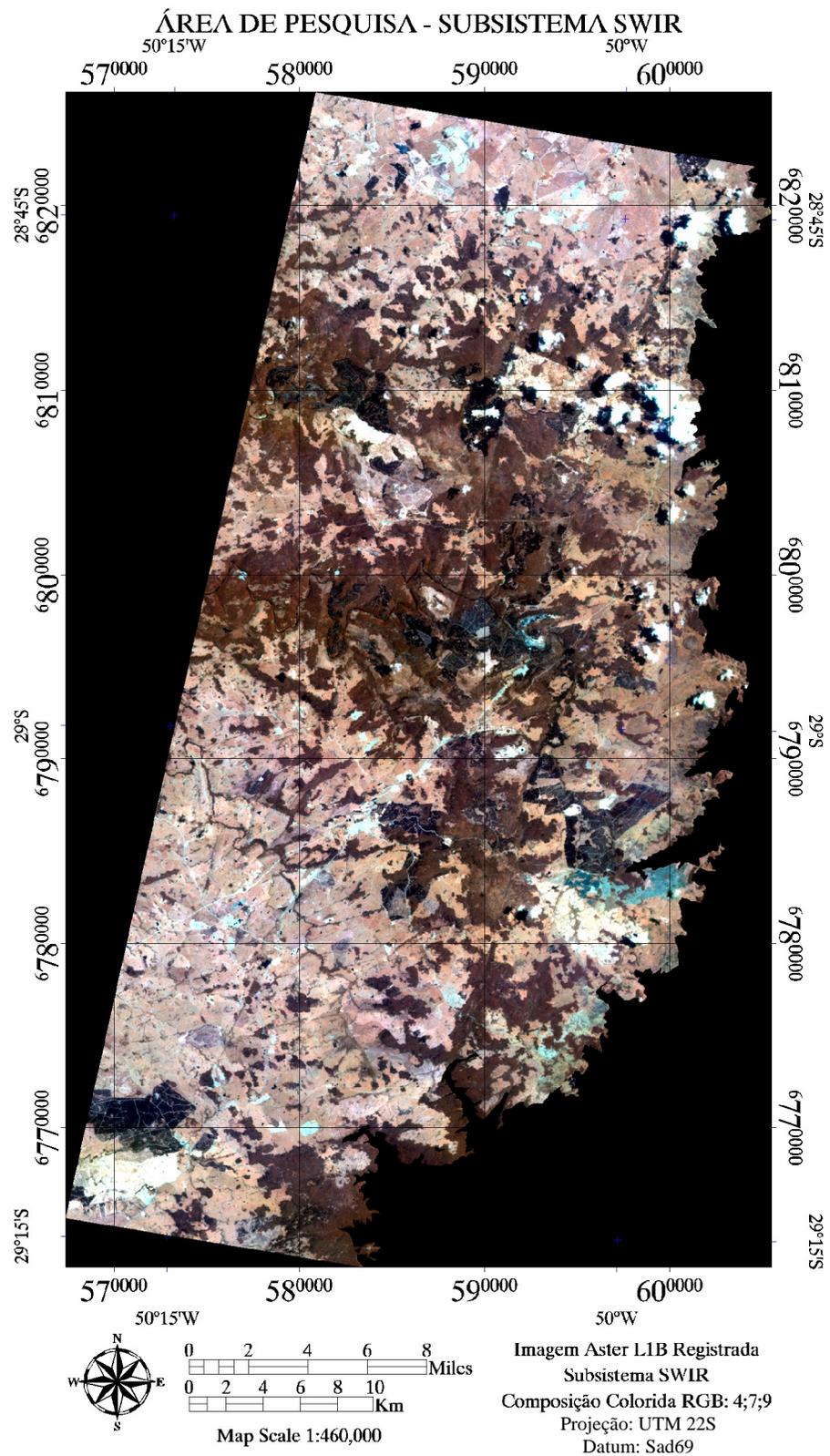


Figura 14. Imagem recortada da cena ASTER L1B, subsistema SWIR.

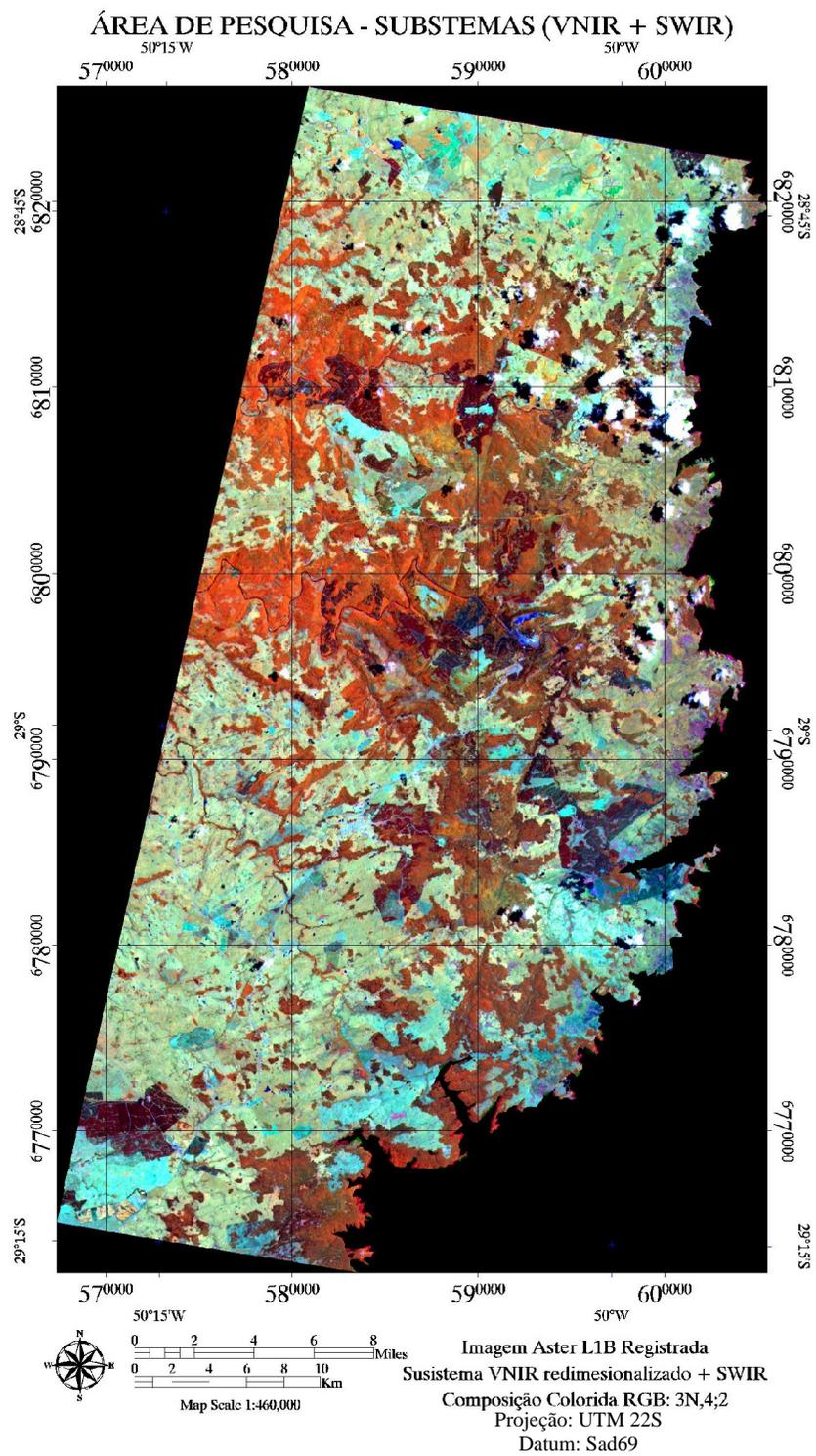


Figura 15. Imagem recortada da cena ASTER L1B, subsistema (VNIR + SWIR).

DETALHE DA REGIÃO

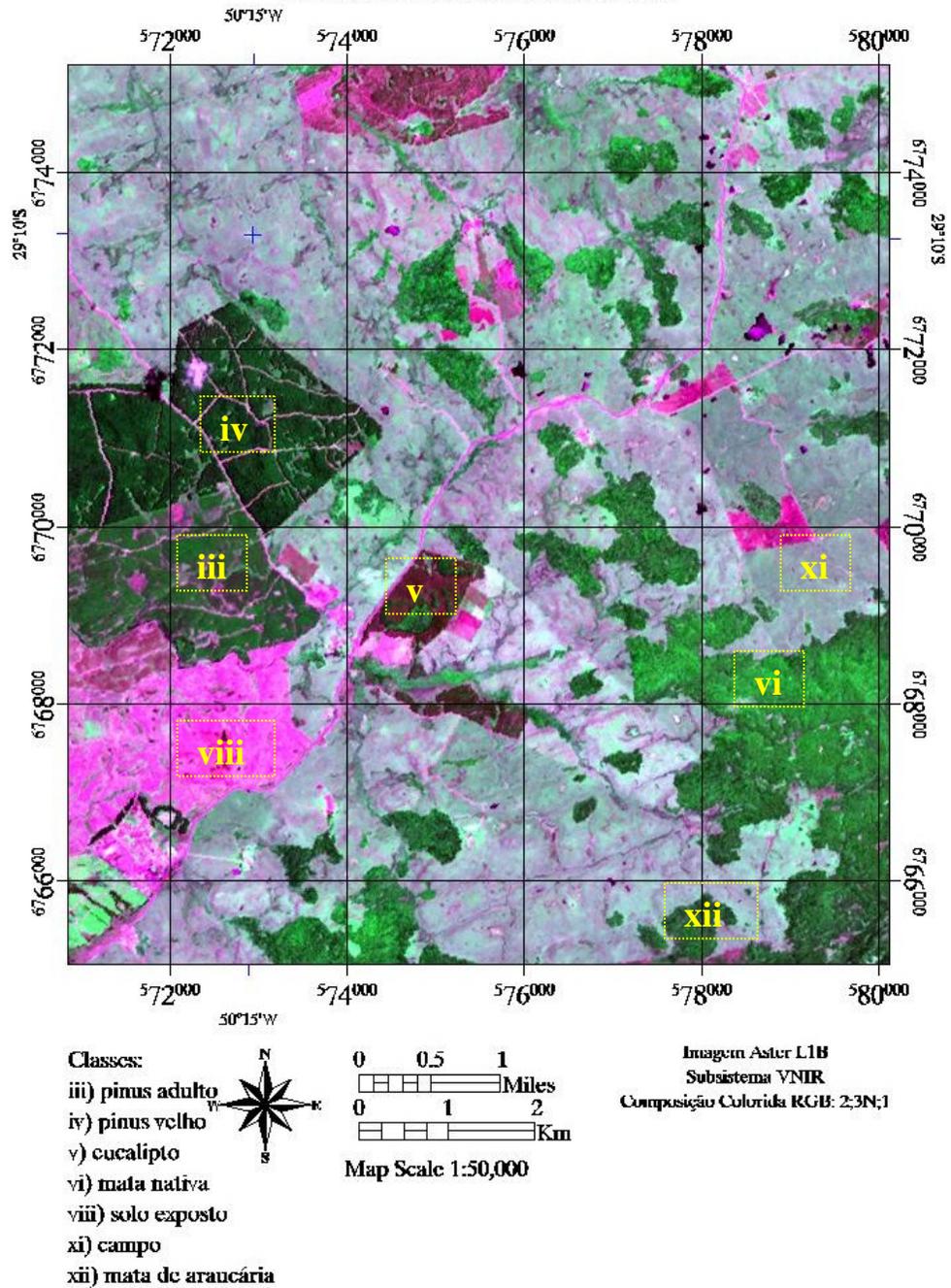


Figura 16a. Algumas áreas das classes amostradas.

DETALHE DA REGIÃO

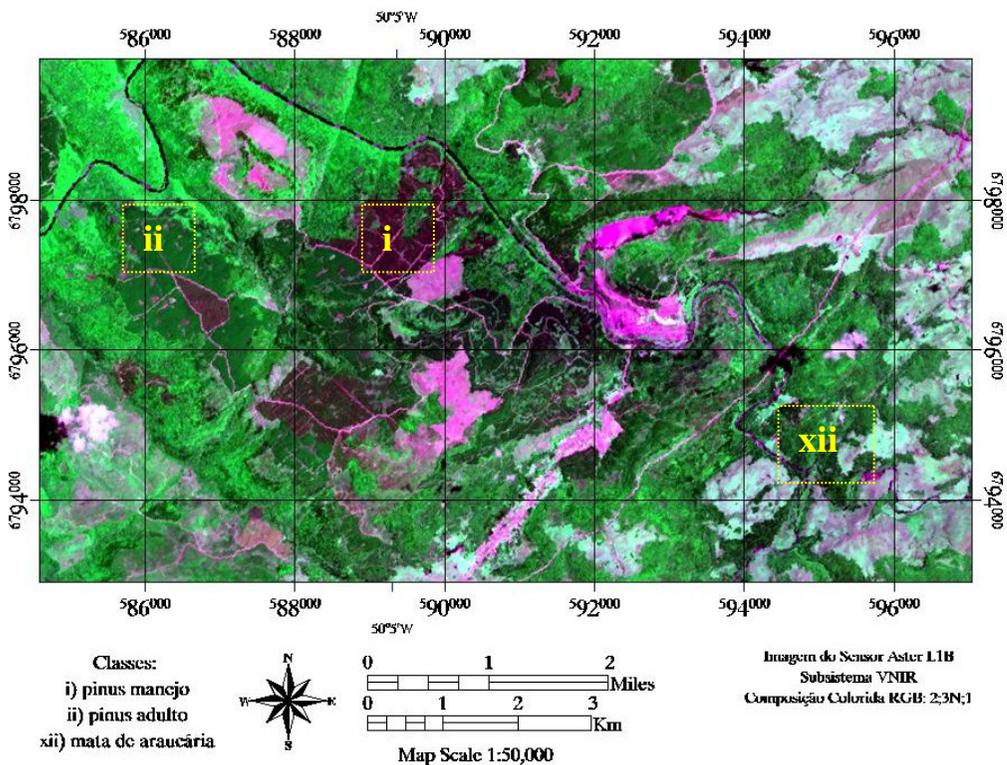
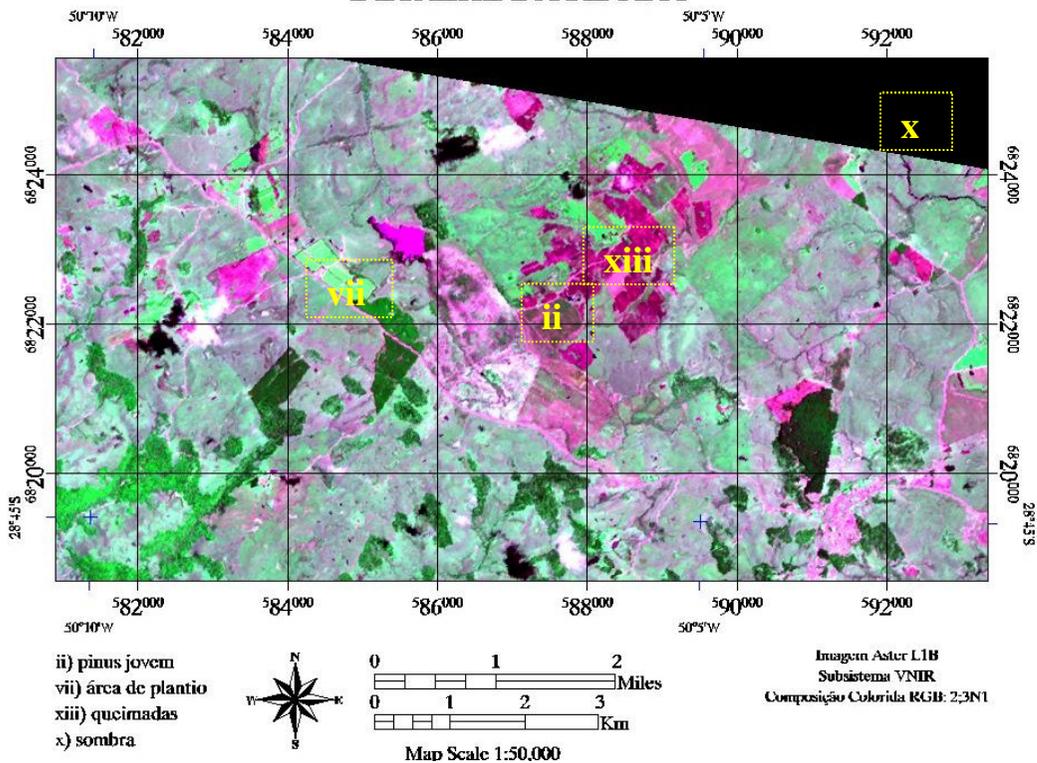


Figura 16b. Algumas áreas das classes amostradas.



Figura 17. Fileiras de pinus retiradas de dentro da mata de forma sistemática. Esta técnica pode ser observada nas imagens em todos os subsistemas VNIR e SWIR.

A classificação através do MAXVER foi totalmente produzida no aplicativo ENVI 3.5. Neste programa, as amostras de treinamento podem ser facilmente trabalhadas já que permite a gravação da área das amostras na imagem, denominadas áreas de interesse. Essas regiões de interesse podem ser aplicadas em distintos classificadores e diferentes conjuntos de imagens a serem classificadas, permitindo que os classificadores supervisionados utilizem sempre as mesmas áreas da imagem para treinamento. O MAXVER foi aplicado nos três conjuntos de bandas, VNIR, SWIR e VNIR+SWIR. As classes foram definidas com igual probabilidade de ocorrência. Em média, tomou-se 15 amostras por classe de interesse. As classes com maior extensão obtiveram maior número de *pixels*/amostra, enquanto que classes com menor extensão foram mais amostradas, cerca de 20 amostras por classes, mas tendo número inferior de *pixels*/amostra. Não foi amostrado a classe “estradas”, já que, na quase totalidade da cena, esta integra a classe “solo exposto”.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

As imagens obtidas na classificação supervisionada podem ser observadas nas Figuras 18, 19 e 20 a seguir. Após realizar a classificação supervisionada nas diferentes combinações de bandas do sensor ASTER, sendo elas agrupadas e nomeadas como VNIR, SWIR e (VNIR + SWIR), obteve-se um montante considerável de dados estatísticos que precisam ser comparados e analisados. Além disso, foi gerada a matriz de confusão e seus índices (Tabelas 9, 10 e 11). A matriz de confusão (Adami et al, 2002) é gerada tomando novas regiões de interesse na cena original como “verdade terrestre” e comparando-as com a imagem classificada, para todos os grupos. Assim, os *pixels* coincidentes definem o percentual de acerto da classe. Os símbolos das matrizes correspondem à Tabela 8.

Tabela 8. Chave de símbolos da matriz de confusão.

CLASSE	SÍMBOLO
Pinus com manejo	P_M
Pinus jovem	P_J
Pinus adulto	P_A
Pinus velho	P_V
Eucalipto	E
Mata nativa	M_N
Área de plantio	A_P
Solo exposto	S_E
Nuvem	N
Sombra	S
Campo	C
Araucária	A
Queimada	Q

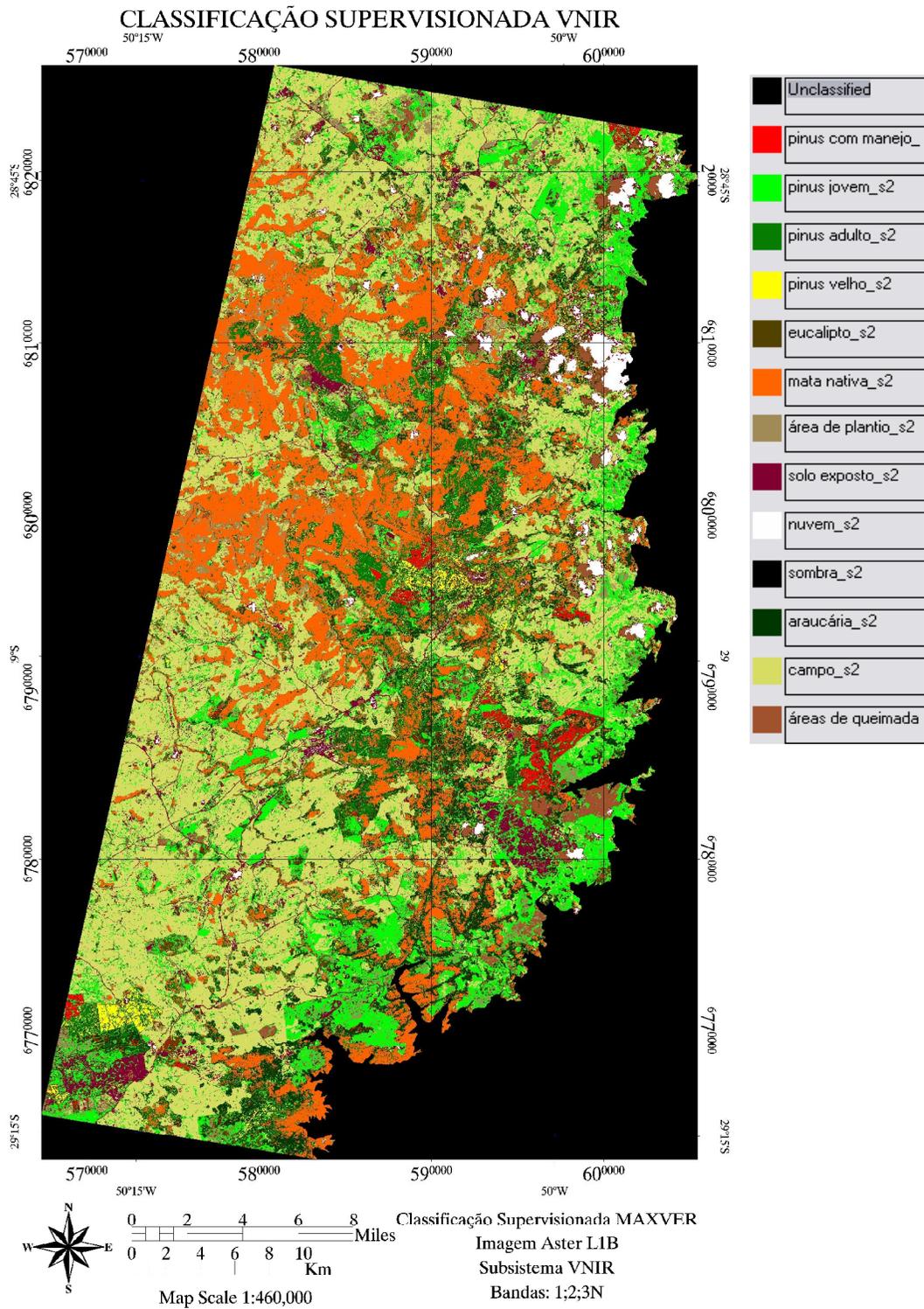


Figura 18. Classificação supervisionada por Máxima Verossimilhança Gaussiana no subsistema VNIR.

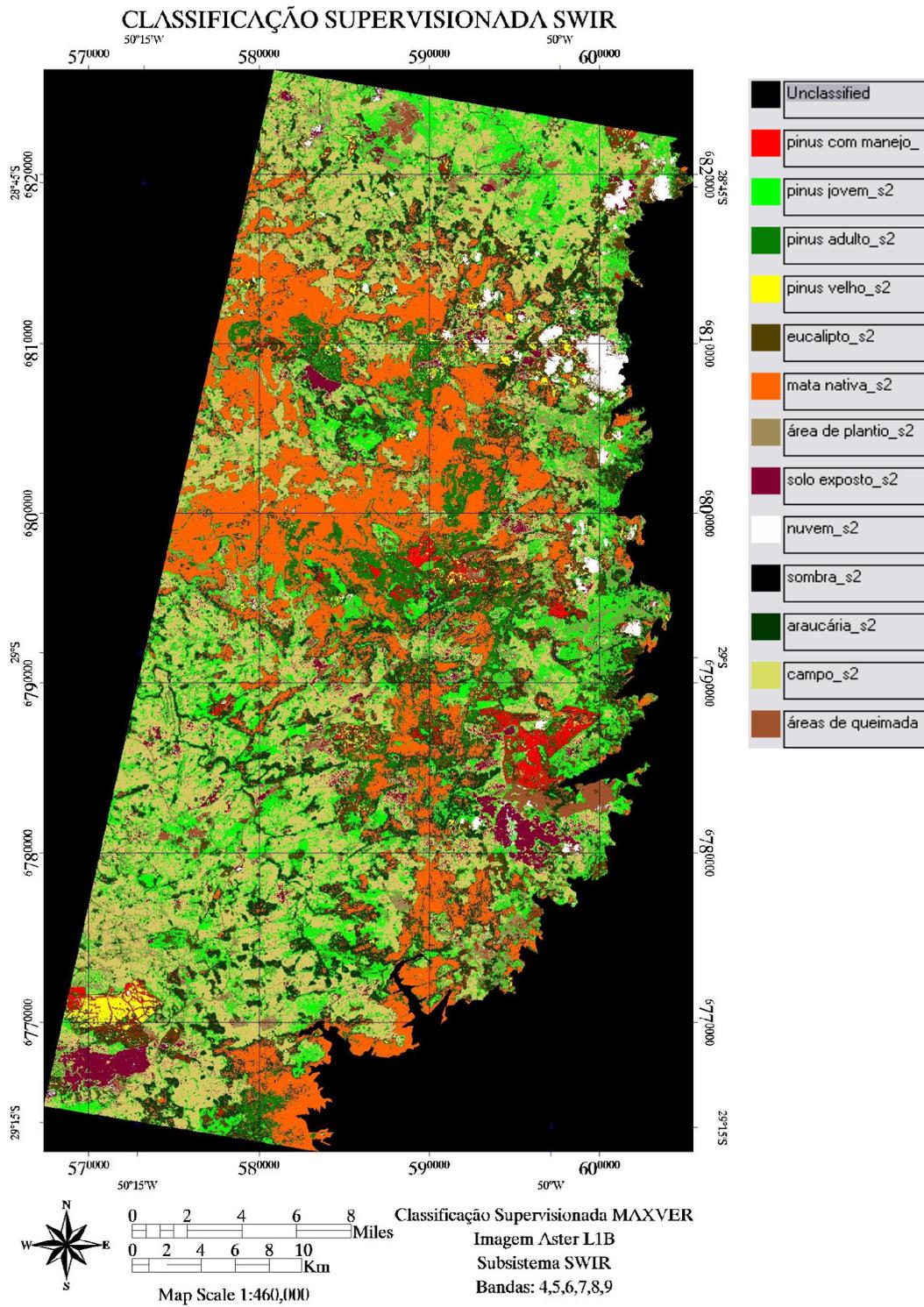


Figura 19. Classificação supervisionada por Máxima Verossimilhança Gaussiana no subsistema SWIR.

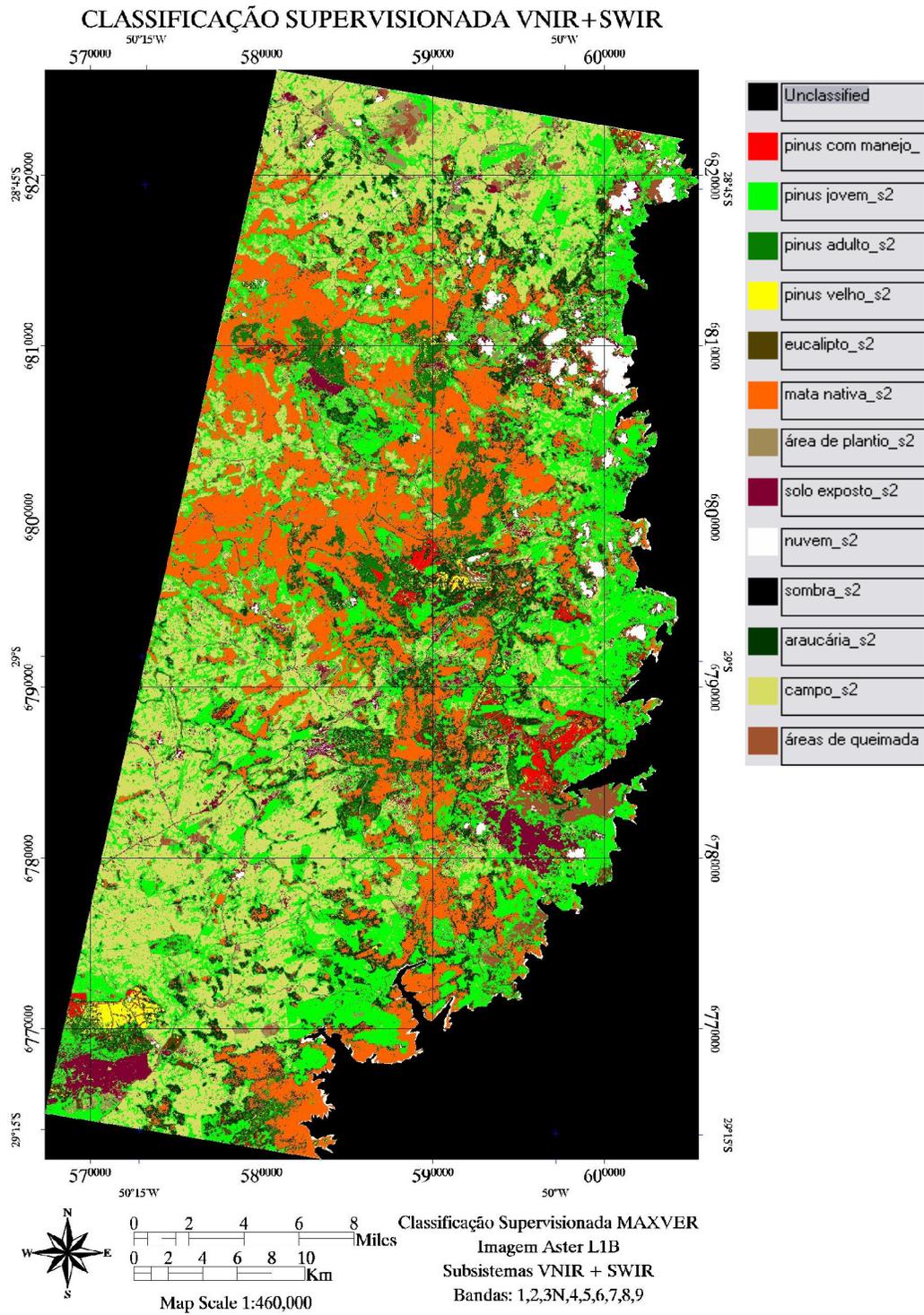


Figura 20. Classificação supervisionada por Máxima Verossimilhança Gaussiana nos subsistemas VNIR + SWIR.

Tabela 11. Matriz de confusão derivada da classificação no subsistema VNIR + SWIR.

MATRIZ DE CONFUSÃO VNIR + SWIR (%)													
Classes	P_M	P_J	P_A	P_V	E	M_N	A_P	S_E	N	S	C	A	A_Q
P_M	80,18	0,00	0,99	4,64	13,33	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3,46	0,00
P_J	2,10	87,12	0,00	0,00	10,10	0,00	8,15	3,49	0,00	0,34	18,20	1,26	0,00
P_A	0,00	0,00	79,54	13,31	0,00	0,23	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	15,09	0,00
P_V	0,30	0,00	4,29	57,89	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,20	0,00
E	15,32	3,32	0,00	0,31	70,00	0,03	0,00	0,00	0,00	0,21	0,15	0,63	0,00
M_N	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	99,97	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	4,40	0,00
A_P	0,44	0,86	0,00	0,00	1,67	1,28	61,52	7,64	0,00	0,00	0,60	0,08	6,21
S_E	0,00	0,48	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	72,27	0,43	0,00	0,05	0,00	0,56
N	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	7,86	99,57	0,00	0,00	0,00	0,00
S	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	89,64	0,00	0,00	0,00
C	0,00	8,80	0,00	0,00	0,00	0,00	30,34	0,44	0,00	0,00	81,00	0,00	0,16
A	1,80	0,00	15,18	23,84	5,00	0,17	0,00	0,00	0,00	8,53	0,00	72,96	0,00
A_Q	0,30	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	8,30	0,00	1,29	0,00	0,00	93,22
TOTAL	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Por classes amostradas, os melhores resultados da matriz de confusão são mostrados na Tabela 12.

Tabela 12. Resultados da Diagonal Principal da Matriz de Confusão nos subsistemas VNIR, SWIR e (VNIR + SWIR).

VALORES DA DIAGONAL PRINCIPAL DA MATRIZ DE CONFUSÃO NOS SUBSISTEMAS CLASSIFICADOS			
CLASSES	VNIR (%)	SWIR (%)	VNIR + SWIR (%)
Pinus com manejo	63,79	75,42	80,18
Pinus jovem	87,93	65,30	87,12
Pinus adulto	77,76	66,28	79,54
Pinus velho	64,64	39,00	57,89
Eucalipto	64,96	68,57	70,00
Mata nativa	98,41	99,09	99,97
Área de plantio	79,59	34,28	61,52
Solo exposto	70,97	61,28	72,27
Nuvem	99,93	97,45	99,57
Sombra	93,54	84,50	89,64
Campo	86,49	70,35	81,00
Araucária	36,70	65,29	72,96
Queimada	95,72	94,18	93,22

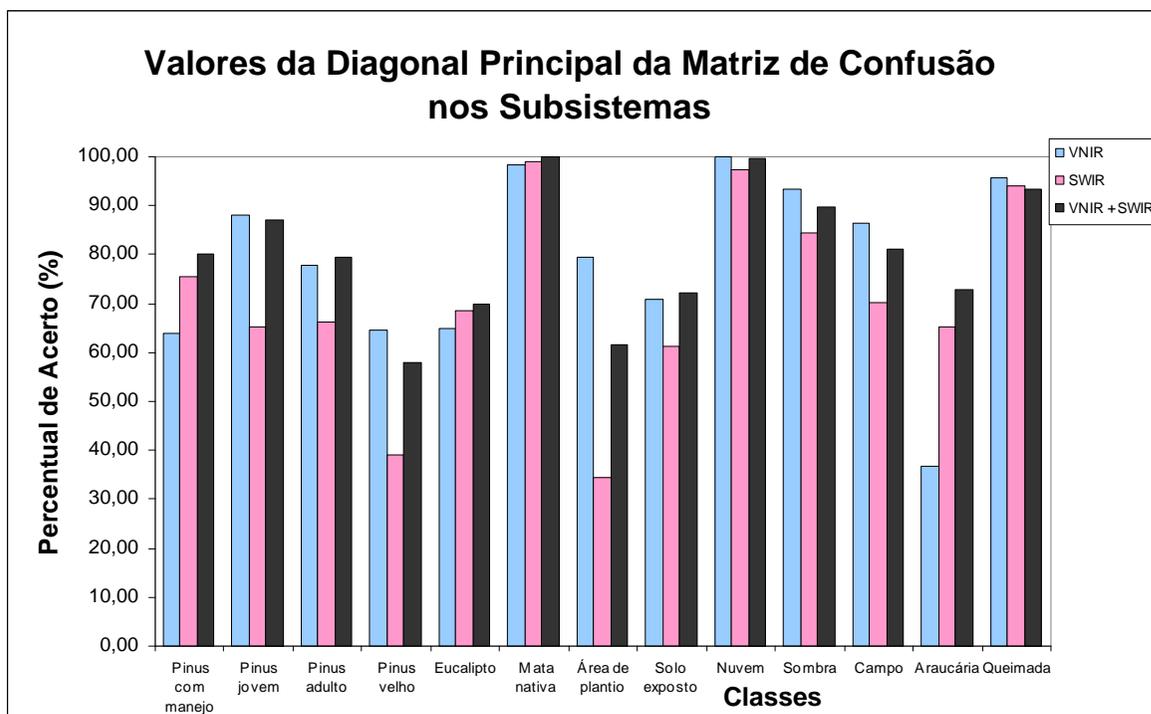


Figura 21. Comparação dos valores da diagonal principal das matrizes de confusão dos três grupos.

Conforme a comparação entre os resultados obtidos da diagonal principal da Matriz de Confusão (Figura 21), é possível verificar que o subsistema VNIR aparece sete vezes com valores percentuais superiores aos demais subsistemas, enquanto que SWIR não vence em nenhum dos casos. Para o conjunto (VNIR + SWIR), em seis vezes seus valores são superiores aos outros subsistemas. Desta forma, VNIR vence com uma diferença de apenas uma vez em relação à (VNIR + SWIR), apresentando também, em certos casos, diferenças pouco significativas entre eles. É importante ressaltar que classes como a “araucária”, com percentual de 36,70% em VNIR, atingiu a marca de **72,96%** quando as bandas se agrupam na forma (VNIR + SWIR).

Outro fato considerável é a diferença de resultados nas classes de pinus, principalmente entre “pinus velho” e “pinus adulto”, sendo da mesma espécie, mas com idades diferentes. Nestes dois casos os melhores índices percentuais não ocorreram no mesmo subsistema, mas nos grupos VNIR e (VNIR+SWIR), respectivamente. Pinus de mesma idade, com intensidades diferentes de manejo, isto é, tendo ou não desbaste e raleio

sistemático, são melhor classificados pelo mesmo subsistema (VNIR), o que indica que a classificação é feita a partir de informações espectrais dependentes da condição “idade”. Desta forma, na relação direta da estrutura foliar que constitui o dossel da planta, condicionada à idade da espécie, deve modificar ou causar a diferença espectral nas classes “pinus adulto” e “pinus velho”.

Também os erros de Comissão e Omissão em todas as classificações podem ser observados nas Tabelas 13, 14 e 15, cujos valores em negrito representam os menores percentuais de erro comparando-se os três subsistemas entre si:

Tabela 13. Erros de Omissão e Comissão expressos em percentuais, subsistema VNIR.

VNIR - ERROS (%)		
CLASSES	OMISSÃO	COMISSÃO
Pinus com manejo	36,21	22,37
Pinus jovem	12,07	26,00
Pinus adulto	22,30	31,19
Pinus velho	35,36	49,38
Eucalipto	35,04	83,21
Mata nativa	1,59	1,52
Área de plantio	20,41	32,03
Solo exposto	29,03	5,17
Nuvem	0,07	0,60
Sombra	6,46	0,00
Campo	13,51	6,00
Araucária	63,30	42,95
Queimada	4,28	72,24

Os erros de Omissão, em média, foram de: 21,43% (VNIR); 29,17% (SWIR); 19,64% (VNIR + SWIR). Do mesmo modo, os erros de Comissão de classificação em SWIR foram superiores aos demais: 28,67% (VNIR); 35,86% (SWIR); 25,23% (VNIR + SWIR). Neste caso, os melhores resultados são da classificação com o maior grupo de bandas, correspondente aos subsistemas (VNIR + SWIR), apresentado menor percentual de erros em média, bem como, o maior número de ocorrências de baixo percentual de erro de comissão e apenas uma ocorrência de diferença com VNIR nos menores percentuais de erros de omissão (6 contra 7, respectivamente). Evidencia-se também a grande dificuldade

em mapear eucaliptos (dada a pouca ocorrência na área de estudo) através dos altos índices de erro.

Tabela 14. Erros de Omissão e Comissão expressos em percentuais, subsistema SWIR.

SWIR - ERROS (%)		
CLASSES	OMISSÃO	COMISSÃO
Pinus com manejo	24,58	16,04
Pinus jovem	34,97	56,95
Pinus adulto	33,72	51,29
Pinus velho	61,00	59,89
Eucalipto	31,43	97,13
Mata nativa	0,91	0,80
Área de plantio	65,72	72,47
Solo exposto	38,72	8,28
Nuvem	2,55	5,76
Sombra	15,50	0,00
Campo	29,65	15,50
Araucária	34,71	57,23
Queimada	5,82	24,85

Tabela 15. Erros de Omissão e Comissão expressos em percentuais, subsistema VNIR + SWIR.

VNIR + SWIR -ERROS (%)		
CLASSES	OMISSÃO	COMISSÃO
Pinus com manejo	19,82	19,58
Pinus jovem	12,88	51,14
Pinus adulto	20,46	27,41
Pinus velho	42,11	16,89
Eucalipto	30,00	63,16
Mata nativa	0,23	1,60
Área de plantio	38,48	25,26
Solo exposto	27,73	2,36
Nuvem	0,43	3,04
Sombra	10,36	0,00
Campo	19,00	8,59
Araucária	27,04	78,34
Queimada	6,78	30,67

É possível observar que os erros causados por classificar um *pixel* numa classe A, sendo que ele não pertence a ela – Erro de Comissão – e de alocar um *pixel* que pertence a uma classe A em outro – Erro de Omissão - foram superiores em média no caso da classificação SWIR. Outro resultado importante, derivado da matriz de confusão, se trata da Acurácia Total, medindo a relação dos *pixels* classificados corretamente dado o universo de *pixels* selecionados para treinamento. Igualmente, o Índice *Kappa* informa também qual a qualidade do mapa temático. (Tabela 16).

Tabela 16. Acurácia Total e Índice Kappa para as diferentes classificações.

Subsistema	Acurácia Total	Índice Kappa
VNIR	90,8851%	0,8129
SWIR	79,8868%	0,7414
VNIR+SWIR	87,1667%	0,8180

Comparando os resultados contidos na Tabela 16, vemos que todas classificações enquadram-se dentro de uma qualidade entre muito boa (SWIR) a excelente (VNIR e VNIR + SWIR). As diferenças mais acentuadas aparecem nos valores da Acurácia Total, em que a classificação com VNIR é superior a todas as demais, seguindo do conjunto (VNIR + SWIR) e com SWIR apresentando o pior resultado.

Considerando que este trabalho estuda a discriminação de classes com respostas espectrais distintas é importante ao pesquisador interessado em alguma delas em particular definir em qual dos subsistemas encontra-se a melhor combinação de bandas, necessária ao estudo de certo alvo. Neste caso, é preciso saber as correlações existentes entre estas bandas a fim de escolher aquelas com menor correlações, isto é, com o menor número de informações repetidas, as quais não acrescentam informações novas e tornam o processamento mais demorado.

Das nove bandas que correspondem aos subsistemas VNIR e SWIR do sensor ASTER, foram verificadas todas as possíveis correlações para cada classe, esperando-se, definir as melhores combinações de bandas. A seguir, é apresentado o resultado da classe

“araucária” (Tabelas 17,18 e 19), nas três matrizes de correlação em cada um dos subsistemas. A totalidade das classes estudadas pode ser observada no Anexo II.

Tabela 17. Correlações entre bandas da classe Araucária no subsistema VNIR.

Correlações Araucária - VNIR			
	B 1	B 2	B 3N
Banda 1	1,000		
Banda 2	0,929	1,000	
Banda 3N	0,851	0,810	1,000

Tabela 18. Correlações entre bandas da classe Araucária no subsistema SWIR.

Correlações Araucária - SWIR						
	B 4	B 5	B 6	B 7	B 8	B 9
Banda 4	1,000					
Banda 5	0,934	1,000				
Banda 6	0,951	0,924	1,000			
Banda 7	0,924	0,905	0,929	1,000		
Banda 8	0,917	0,902	0,929	0,925	1,000	
Banda 9	0,799	0,800	0,798	0,835	0,832	1,000

Tabela 19. Correlações entre bandas da classe Araucária no subsistema (VNIR + SWIR).

Correlações Araucária – (VNIR +SWIR)									
	B 1	B 2	B 3N	B 4	B 5	B 6	B7	B 8	B 9
Banda 1	1,000								
Banda 2	0,942	1,000							
Banda 3N	0,784	0,649	1,000						
Banda 4	0,706	0,661	0,672	1,000					
Banda 5	0,646	0,632	0,541	0,920	1,000				
Banda 6	0,677	0,648	0,618	0,960	0,925	1,000			
Banda 7	0,658	0,637	0,580	0,944	0,934	0,938	1,000		
Banda 8	0,653	0,640	0,564	0,936	0,927	0,938	0,949	1,000	
Banda 9	0,551	0,549	0,486	0,829	0,865	0,839	0,878	0,874	1,000

Em cada uma das três tabelas de correlação é possível definir o melhor grupo de bandas para mapeamento da classe “araucária”. O valor das correlações entre bandas nos subsistemas independentes VNIR e SWIR modifica quando agrupamos os dois no subsistema (VNIR + SWIR), obtendo em certos casos, valores significativamente diferentes. É importante lembrar, que os *pixels* de VNIR são reamostrados a fim de ter 30 metros de resolução espacial, modificando sua informação original, daí apresentando novos

valores de correlação. No caso de SWIR, a presença de outro subsistema altera sua correlação, mas de forma pouco relevante. Segundo os resultados sugere-se as bandas **3N, 5** e **9**, para o mapeamento da araucária por apresentarem menor correlação entre si. Entretanto, não fez-se novo agrupamento e classificação, levando-se em conta o resultado anterior, uma vez que o trabalho espera fornecer resultados gerais do desempenho deste sensor ASTER.

Este resultado de correlação é novo, quando se considera o que até agora se usava com dados Landsat. Neste satélite, a banda 5 (na região espectral da banda 4 do ASTER) é considerada a melhor banda para classificação da araucária e vegetação nativa quando combinada às bandas 3 e 4. Com o sensor ASTER o domínio espectral é estendido até maiores comprimentos de onda, disponibilizando novas informações para a classificação; isto faz com que a banda 5 do ASTER, parcialmente contida na banda 7 do Landsat, se torne a melhor opção, quando usada em conjunto com a banda 9 e 3N do ASTER no mapeamento da araucária.

Contudo, mesmo com a enorme relevância dos dados de avaliação da acurácia de mapeamento, os quais fornecem qual dos grupos apresentou melhor resultado, o dado que representa as distribuições das classes na superfície é o da estimativa de área. Este resultado pode quantificar a presença das espécies exóticas, como é o caso do pinus e eucalipto, bem como de espécies ameaçadas de extinção, tal como a araucária (Tabelas 20 e 21). Esta estimativa de área permite avaliar o percentual de invasão sobre a região de estudo fornecendo dados físicos, de modo que seja possível definir e estudar critérios alternativos para a presença desses maciços de floresta exótica. A classe “sombra” não foi incluída da estimativa uma vez que não foi representada em nenhum momento na área mapeada, mas somente na área fora de cena.

Do total de área de pesquisa classificada, a parte correspondente a cena mapeada tem dimensão estimada em 1543,63 km², nesta área, somando as classes de pinus, em todos os estágios, temos a presença em: **22,28%** em VNIR; **23,82%** em SWIR; **33,43%** em (SWIR + VNIR) da área mapeada. Considerando na avaliação estatística acima, dados pelas Acurácia Total, Índice *Kappa*, bem como os erros de Comissão e Omissão, vê-se que

a melhor classificação é a do grupo VNIR. Somando os melhores resultados parciais das classes de “pinus”, “área de plantio”, “eucalipto” e “solo exposto”, tem-se **31,33%**, isto significa que na extensão total da área cerca de 1/3 da cena não apresenta mais cobertura original.

Tabela 20. Comparação entre as áreas das classes obtidas nos três grupos classificados.

Área das Classes nas Regiões da Cena			
CLASSES	VNIR (km²)	SWIR (km²)	VNIR + SWIR (km²)
Pinus com manejo	17,77	33,91	25,02
pinus jovem	226,36	257,47	431,91
pinus adulto	78,28	59,43	47,71
pinus velho	21,58	16,92	13,16
eucalipto	64,97	123,92	18,29
mata nativa	289,66	286,18	322,43
Área de plantio	85,75	120,10	50,29
solo exposto	80,72	49,42	59,39
nuvem	20,75	27,22	34,19
araucária	132,45	183,45	156,49
campo	495,73	365,44	360,19
área de queimada	29,61	20,18	29,06

Tabela 21. Comparação entre as distribuições percentuais das classes em cada subsistema.

Distribuição Percentual das Classes sobre a Totalidade da Imagem			
CLASSES	VNIR (%)	SWIR (%)	VNIR + SWIR (%)
Pinus com manejo	1,151	2,197	1,615
pinus jovem	14,664	16,679	27,887
pinus adulto	5,071	3,850	3,081
pinus velho	1,398	1,096	0,850
eucalipto	4,209	8,027	1,181
mata nativa	18,765	18,539	20,819
área de plantio	5,555	7,780	3,247
solo exposto	5,229	3,201	3,835
nuvem	1,344	1,763	2,208
araucária	8,581	11,884	10,104
campo	32,115	23,673	23,257
área de queimada	1,918	1,307	1,876

No entanto, a classificação (VNIR + SWIR) apresentou resultado superior em classes de alta relevância, como é o caso da araucária, com índices de **72,96%** na Matriz de Confusão. Aqui, ocorre o problema de mapear esta espécie, uma vez que, escolhendo a classificação (VNIR + SWIR), perde-se a qualidade gerada pela classificação VNIR, a qual apresentou melhores índices gerais e tem resolução espacial de 15 metros. Neste caso, uma superposição das duas classificações prejudicaria certas classes melhor mapeadas na classificação VNIR, e certas características de detalhamento da cobertura do solo, já que seria necessário redimensionar os *pixels* desta imagem a fim de terem igual dimensão espacial. A solução sugerida é um mapa das araucárias, independente, gerado a partir do melhor resultado classificado (Figura 22).

Outro fator relevante corresponde à análise da distribuição das classes em termos de Radiância. Para tanto, as imagens classificadas são superpostas nas imagens originais com quais foram derivadas calculando-se então os valores de Radiância das classes sobre a cena. A seguir, são apresentados os resultados, por classe, da Radiância Média (Tabelas 22, 23 e 24).

Tabela 22. Radiância Média das classes no subsistema VNIR.

RADIÂNCIA MÉDIA DAS CLASSES - VNIR (W/(m² sr μm))			
CLASSES	B1	B2	B3N
pinus com manejo	36,3843	22,5457	59,0785
pinus jovem	46,5168	32,1434	75,5827
pinus adulto	35,2183	18,6848	70,7553
pinus velho	34,3297	18,2263	59,8822
eucalipto	40,3131	25,0211	67,4470
mata nativa	37,9566	20,0606	87,6488
área de plantio	46,5073	30,2735	90,3424
solo exposto	56,1489	42,2527	82,5091
nuvem	119,9754	99,0716	117,8193
campo	49,1621	31,6310	88,3949
araucária	37,7657	21,5053	71,4091
áreas de queimadas	40,5850	28,0744	44,7202

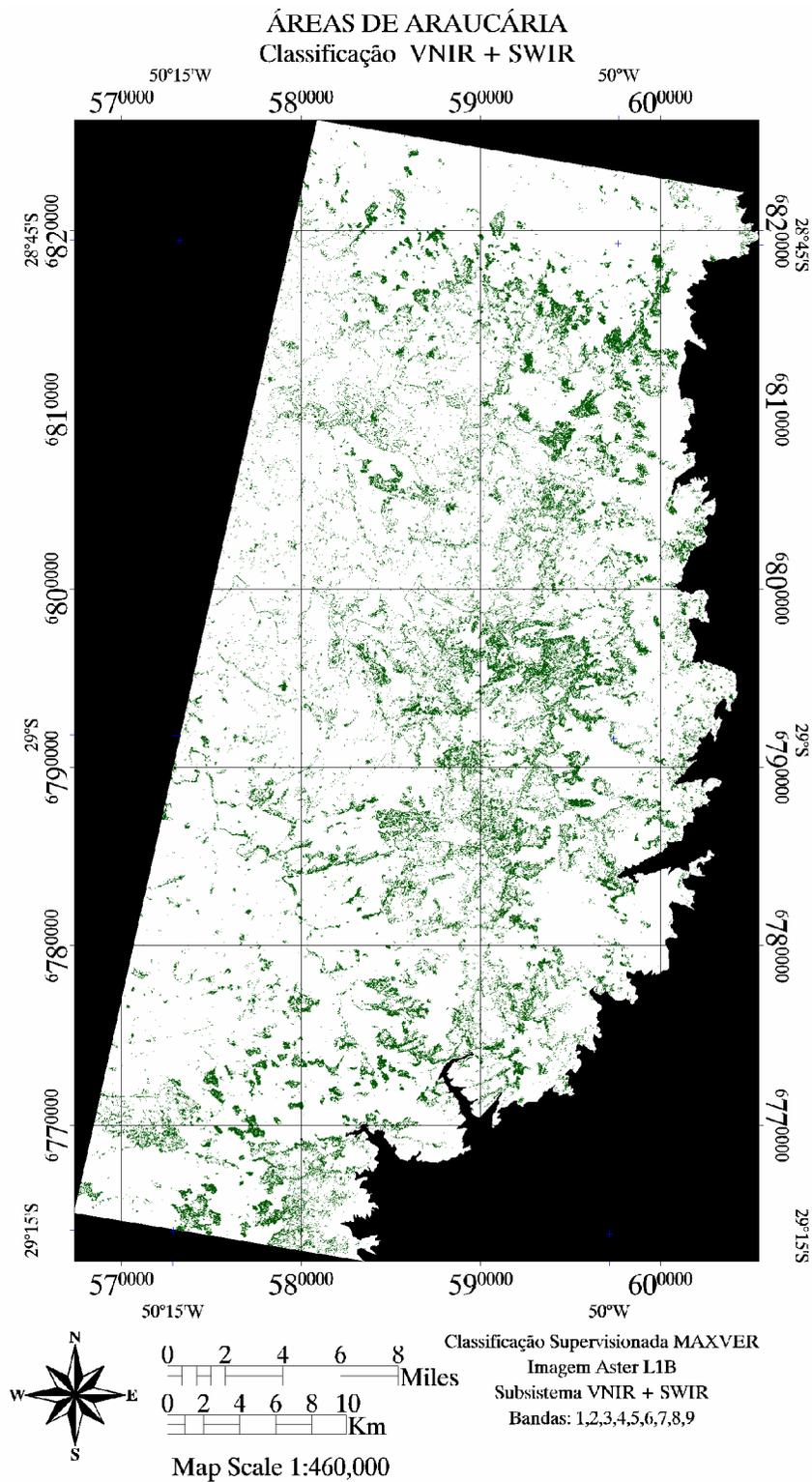


Figura 22. Mapa das araucárias na região de pesquisa gerado pela classificação (VNIR + SWIR). As áreas de araucária estão apresentadas em verde. Percentual de acerto de 72,96% na matriz de confusão.

Tabela 23. Radiância Média das classes no subsistema SWIR.

RADIÂNCIA MÉDIA DAS CLASSES - SWIR (W/(m ² sr μm))						
CLASSES	B4	B5	B6	B7	B8	B9
pinus com manejo	9,6305	2,2036	2,0439	1,7041	1,0807	0,8798
pinus jovem	14,8147	3,1158	3,0047	2,5059	1,6159	1,1713
pinus adulto	8,5057	1,8650	1,6441	1,4115	0,8625	0,7196
pinus velho	7,2986	1,7865	1,4876	1,3164	0,8087	0,7422
Eucalipto	12,0758	2,6146	2,4335	2,0895	1,3166	1,0139
mata nativa	10,6824	2,1145	1,9279	1,6730	1,0087	0,8051
área de plantio	15,1849	3,2213	3,0832	2,6903	1,7180	1,2121
solo exposto	18,2401	3,9408	3,9229	3,3236	2,1783	1,4582
Nuvem	19,3208	4,8172	4,9024	4,3516	3,0719	2,1362
Campo	16,3705	3,3261	3,2257	2,7447	1,7431	1,2287
Araucária	10,7111	2,3052	2,0598	1,7944	1,0946	0,8717
áreas de queimadas	12,6520	3,4056	3,2274	2,8277	1,9208	1,3588

Tabela 24. Radiância Média das classes no subsistema (VNIR + SWIR).

RADIÂNCIA MÉDIA DAS CLASSES - (VNIR + SWIR) (W/(m ² sr μm))									
CLASSES	B1	B2	B3N	B4	B5	B6	B7	B8	B9
pinus com manejo	37,4043	23,5390	61,2254	9,5406	2,1813	2,0094	1,6967	1,0719	0,8732
pinus jovem	46,7387	31,1391	80,0580	14,3366	2,9920	2,8736	2,4323	1,5504	1,1214
pinus adulto	35,0609	18,7887	70,0158	8,3580	1,8602	1,6097	1,3939	0,8481	0,7216
pinus velho	34,4315	18,5951	59,3992	7,5689	1,8202	1,5427	1,3516	0,8324	0,7509
eucalipto	39,9316	26,4669	61,1823	11,8383	2,6945	2,4835	2,1381	1,3600	1,0309
mata nativa	37,9582	20,2394	85,8963	10,6882	2,1352	1,9388	1,6818	1,0146	0,8108
área de plantio	47,0121	31,5784	87,9783	15,3365	3,3389	3,2030	2,7894	1,8097	1,2910
solo exposto	55,1062	40,9099	81,7415	17,4218	3,8005	3,7499	3,1901	2,0910	1,4142
nuvem	88,1005	70,6910	95,5821	16,5527	4,1269	4,1829	3,7138	2,6465	1,8548
campo	49,6399	32,0130	89,2766	16,3035	3,3307	3,2146	2,7334	1,7363	1,2319
araucária	37,721845	21,371174	70,620185	10,196570	2,223426	1,998435	1,729185	1,061046	0,860574
áreas de queimadas	43,5585	31,6302	51,1850	11,6644	3,0275	2,8472	2,4899	1,6578	1,2103

Nota-se que há diferença dos valores de Radiância Média nas classes para uma banda em cada subsistema. Sendo a radiância um valor físico independente do subsistema em uso é possível identificar duas justificativas para este caso: devido aos filtros ou a diferentes áreas classificadas. Os filtros agem provocando absorção dos comprimentos de

onda indesejados e permitindo a transmissão somente dos comprimentos de onda desejados. No entanto, é muito comum a transmissividade em outros comprimentos de onda, efeito chamado de vazamentos ou “leaks” (Johnson, 1963) geralmente ocorrendo para maiores comprimentos de onda. Entretanto, a análise das diferenças de radiação nos subsistemas mostrou que a variação da radiância não é uniforme e sistemática para uma banda em todas as classes. Isto torna esta explicação para as diferenças de radiância menos provável.

O fato de se incluir mais bandas aumenta a quantidade de informação para a classificação, mudando, portanto, os parâmetros da diferenciação entre classes. É natural, portanto, que, a atribuição a cada *pixel* de uma classe sofra alguma alteração levando no conjunto da imagem a um mapeamento por classe ligeiramente diferente. São incluídos portanto, numa classe, *pixels* com novos valores de Radiância Média diferentes. Pode-se verificar o comportamento desta distribuição de classes em termos da Radiância Média nas bandas, através nos gráficos abaixo (Figuras 23, 24 e 25).

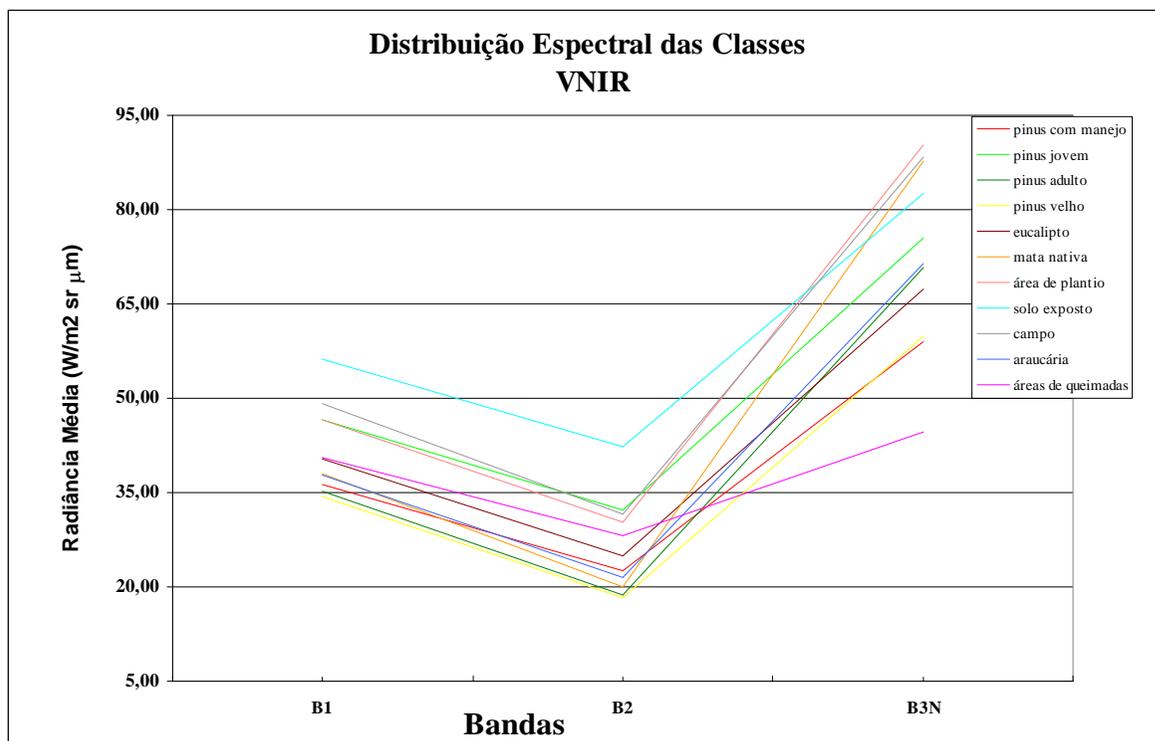


Figura 23. Radiância Média das classes em cada banda – subsistema VNIR

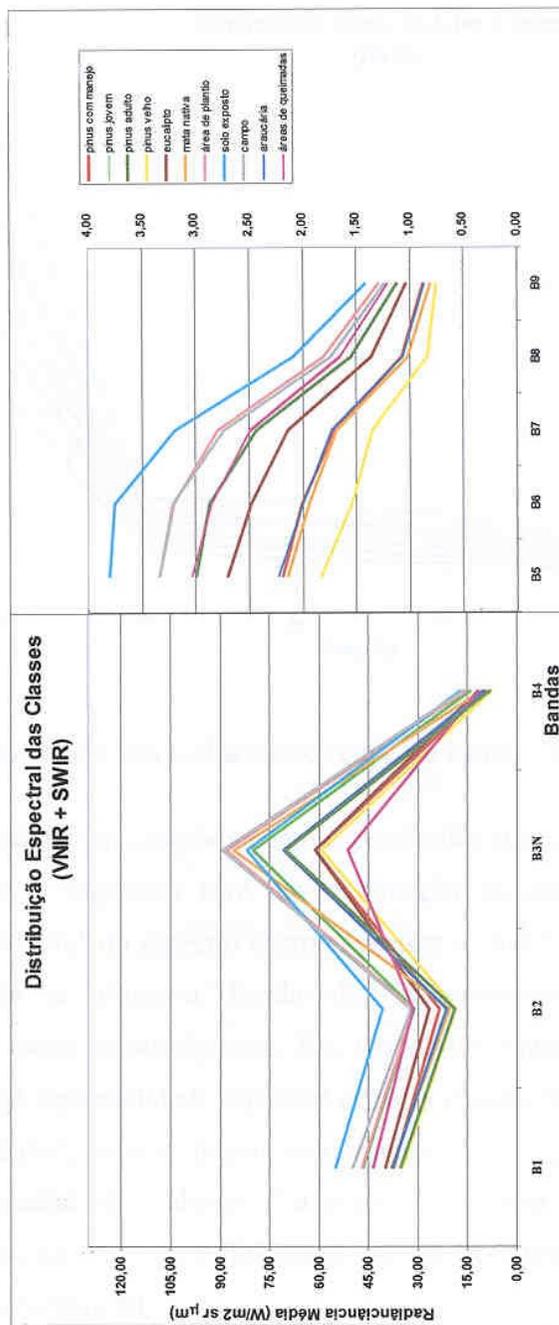


Figura 24. Radiância Média das classes em cada banda – subsistema (VNIR + SWIR).

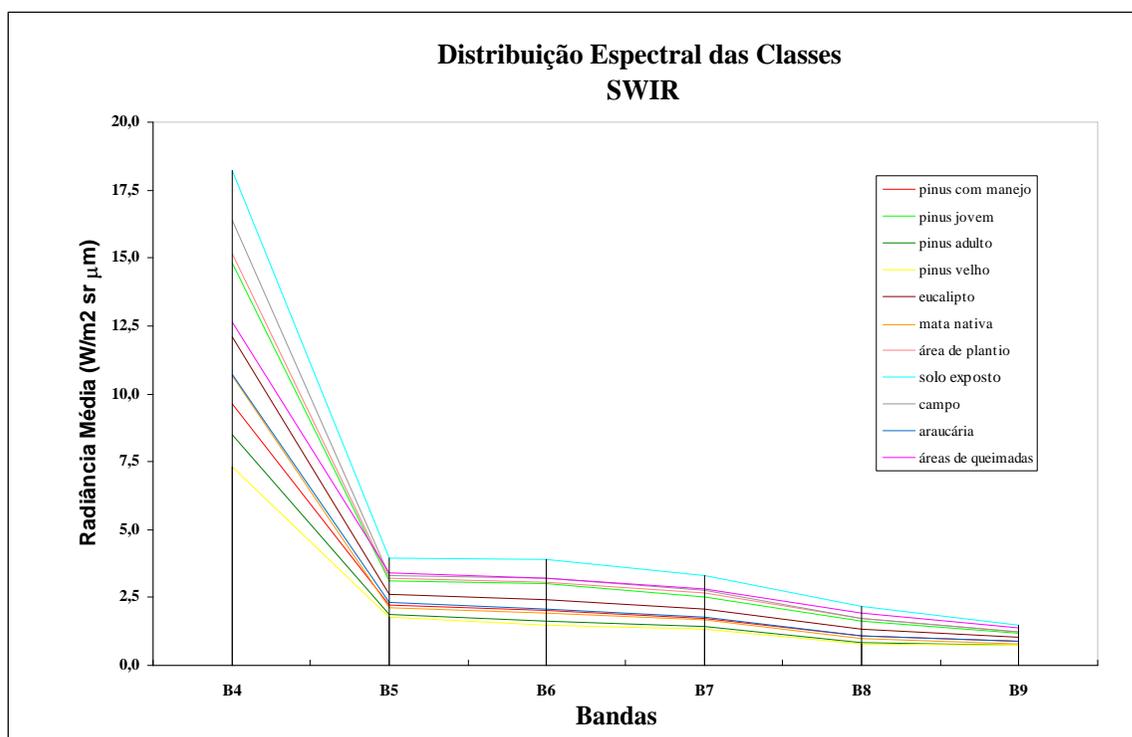


Figura 25. Radiância Média das classes em cada banda – subsistema SWIR.

De forma geral, há um comportamento esperado das classes amostradas em todos os subsistemas, isto é, a vegetação teve uma diminuição da radiância na banda 2 que corresponde ao “vermelho” do espectro eletromagnético, e um forte crescimento na banda 3N, que corresponde à primeira banda do infra-vermelho, constatando-se este comportamento em todos os subsistemas. Em termos de diferenciação das espécies de vegetação entre si, há separabilidade espectral entre as classes “pinus velho”, “pinus jovem” e “pinus adulto”, principalmente nas bandas 3N e 5 para todos os grupos. O comportamento espectral das classes “araucária” e “mata nativa” tiveram maior diferenciação nas bandas 3N, 5 e 9 do subsistema VNIR + SWIR, como observados nas tabelas de correlação (Anexo II).

A classe que corresponde a “solo exposto” teve os maiores valores de radiância em todos os subsistemas e grande diferenciação em relação a todas as outras classes, apresentando um comportamento esperado de radiância de solos, com uma diminuição na região da banda 9 e intensidades ajustadas aos valores de ganho e *offset* do sensor ASTER.

Uma estimativa da qualidade do presente trabalho pode ser feita se compararmos nossos resultados com estudos realizados na mesma região, utilizando, seja outras técnicas, seja outros sensores. Neste aspecto, a literatura não é muito abundante, e uma comparação quantitativa pode ser feita com o trabalho realizado por Ducati *et al.* 1999.

Este estudo utilizou imagens Landsat dos anos de 1995 e 1997. A comparação é dificultada pela diferença entre as áreas cobertas pelos dois estudos. Dado que a superfície do município de Cambará do Sul, segundo o IBGE, é de 115.800 ha, nosso trabalho cobriu 92,50% desta área, ou seja, 107.110,04 ha, ficando excluídas algumas regiões não cobertas pela imagem da figura 10. A região de Cambará coberta pelo Projeto Sindimadeira totaliza 127.446,20 ha, ou seja, aproximadamente 20.000 hectares a mais. Tendo em mente esta diferença, mostramos na tabela 25 alguns indicadores comparativos de seis classes, incluindo para o presente estudo resultados para os subsistemas VNIR e (VNIR + SWIR), estando grafado, para cada classe, o subsistema de melhor desempenho segundo os critérios mencionados anteriormente (Tabela 12), sendo em *itálico* o subsistema VNIR e sublinhado o subsistema VNIR + SWIR.

Tabela 25. Comparação das classes de interesse com resultados anteriores (Ducati *et al* 1999).

Município de Cambará do Sul (em hectares)						
	Pinus	Eucalipto	Araucária	Mata Nativa + Ciliar	Campo	Solo Exposto
Ducati et al 1999	8.775,9	674,9	14.827,3	33.916,1	64.631,1	4.027,3
Este Trabalho	<i>10.075,0</i>	<u>1.430,1</u>	<u>11.814,5</u>	<u>24.693,1</u>	<i>30.809,9</i>	<u>4.421,7</u>

Para a classe “pinus”, o resultado pelo subsistema VNIR indica um incremento considerável nas florestas desta espécie, o que é esperado, dado o espaço de tempo transcorrido entre os dois estudos, ocorrendo o mesmo para a classe “eucalipto”. A diminuição nas classes “araucária” e “mata nativa + ciliar” é devida basicamente à diferença entre as áreas estudadas, como mencionado acima, pelo fato de que as áreas de Cambará excluídas da imagem ASTER coincidem com a Floresta Nacional de São

Francisco de Paula e com as drenagens dos rios das Antas e Rio Santana, que são intensamente florestadas. A observação da região, quando dos trabalhos de campo, não evidenciou a ocorrência de maiores desmatamentos de florestas nativas na região em relação às imagens Landsat (maio 1995/1997) e ASTER (novembro de 2000). A classe “solo exposto” permaneceu constante. Por outro lado, o presente trabalho introduziu algumas novas classes, notadamente “pinus jovem” e “áreas de cultivo”, inexistentes em Ducati *et al*,1999. A assinatura espectral destas classes é semelhante à da classe “campo”, e se somarmos as superfícies em hectares de (com melhores desempenhos) “campo: 30.809,56 ha” + “pinus jovem: 16.090,86 ha” + “áreas de cultivo: 5.362,72 ha” teremos um valor de 52.262,61 ha, próximo à área da classe “campo” em Ducati *et al* (1999), ressalvada a diferença de 20.000 ha já mencionada, e dado ainda que as implantações de pinus jovem, com idades inferiores a dois anos, crescem sobre o próprio campo, estando misturadas ou sobrepostas às gramíneas nativas.

Aqui comparam-se resultados obtidos com dados separados por três e cinco anos. Por ocasião dos trabalhos de 1999, constatou-se a existência de implantações novas (com idades de um a dois anos) de pinus, extremamente intensas (comunicação pessoal de J. Ducati). Estas florestas, na imagem ASTER de novembro de 2000, provavelmente já figuram, em boa parte, como classe “pinus”. Com esta ressalva em mente, e considerando a área total do município, obtida com a soma de todas as classes (e excetuando a parte de Cambará não coberta pela imagem ASTER, equivalente a 7,5 %), vemos que em geral há coerência entre os dados Landsat e ASTER.

O que se observa claramente é um acréscimo na quantidade de florestas de pinus, há provavelmente um fator de incerteza com respeito ao pinus jovem, como se pode constatar examinando as figuras 18 e 20, onde há confusão com outras classes, provavelmente campo, que é onde o pinus é em geral plantado. De qualquer forma, o campo apresenta forte retração, o qual provavelmente ocupado por áreas de pinus jovem, cujo mapeamento não foi executado em Ducati *et al* 1999. A classe que sofreu menor diferenciação corresponde à de solo exposto, cuja variação não deve ser muito diferente, já que são áreas de permanente uso.

É importante salientar que há um intervalo de cerca de cinco anos entre as datas das imagens ASTER e Landsat, e também, que cerca de 7,5 % do município de Cambará do Sul não estava na imagem ASTER. De qualquer forma, era de esperar-se um aumento nas áreas de floresta exóticas devido à acelerada exploração destas pela indústria madeireira.

Em suma, conclui-se que a utilização de dados ASTER leva a um aumento na acurácia da classificação de vegetação em geral permitindo um monitoramento da cobertura vegetal e uso do solo de forma mais precisa.

6. CONCLUSÕES

Na área de estudo, as ações antrópicas têm avançado tanto quanto em todo o Estado do RS, alcançando desde as porções mais altas até as zonas de terraços dos rios, de forma que estas plantações de florestas exóticas quanto as áreas de cultivo se estendem intensivamente.

Novas áreas de cultivo sobre o campo, nesta classificação, indicadas como “pinus jovem” estão presentes em quase toda área mapeada, sejam em pequenas ou grandes dimensões, ainda dificilmente classificada devido à sua resposta espectral confundir-se com solo exposto e áreas de campo.

Através da análise dos dados levantados em campo e interpretações visuais da imagem pode-se verificar que a área de estudo apresenta diversidade expressiva de idades das florestas de pinus e diferentes manejos, as quais foram descritas no momento da definição das classes.

Dividindo o número de bandas em resoluções espaciais, com grupos VNIR, SWIR e VNIR + SWIR obteve-se em todos casos alta Acurácia Total e Índice *Kappa*. Dentre eles recomenda-se como resultado final o grupo VNIR, pois este além de alta resolução espacial (15 metros) apresentou a mais alta Acurácia Total, definindo também detalhes de superfície com maior qualidade, embora o grupo VNIR+SWIR seja o melhor grupo para o mapeamento de florestas.

Houve o problema das classes sombra e queimadas em todos os grupos. A classe sombra aparece na matriz de confusão razoavelmente classificada, dada a grande dimensão da área fora de cena incluída nas amostras da classe, mas nas áreas de sombra de nuvem fica não classificada corretamente, com ocorrência em todos os grupos classificados. Assim, a quase totalidade da classe nestas regiões de sombra de nuvem pertenceu à classe de áreas de queimada. Isto prejudicou fortemente a quantificação e impactos das queimadas sobre a cena pesquisada. Sabe-se, contudo, que o manejo dos campos ainda é feito através de queimadas, principalmente nos meses de setembro e outubro. Uma solução possível para a minimização do efeito da sombra, pode-se, por exemplo, digitalizar as curvas de nível da região, bem como a utilização do modelo numérico do terreno.

A quantificação e mapeamento tiveram resultados levemente diferenciados nas classificações, acentuado-se em algumas classes amostrais. De modo geral, a presença de espécies de pinus jovem, consolidado (adulto), velho (resposta espectral com menor valor de brilho) diferente manejado (raleio e desbaste sistemático) e de eucalipto, ocorreram em cerca de 23% a 34% da área estudada. Isto implica um novo perfil das características sociais, econômicas e ambientais dos Campos de Cima da Serra.

Como resultado final deste trabalho, pode-se concluir que técnicas de Sensoriamento Remoto são extremamente úteis para análise ambiental, especificamente, para constatação mais rápida e eficaz no mapeamento da cobertura do solo. Estes resultados são somados ao desempenho excepcional do sensor ASTER, tanto no seu subsistema VNIR, quanto na combinação dos subsistemas (VNIR + SWIR), capaz de realizar o levantamento ambiental de forma eficaz, abrangendo uma grande extensão de área sobre a superfície terrestre, com alta precisão e acurácia.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRAMS, M. ASTER User Handbook. V.1, JPL, NASA, 1999.

ADAMI, M., et al. Aplicação de diferentes algoritmos para a classificação de imagens ETM⁺/LANDSAT-7 no mapeamento agrícola. INPE-8971-NTC/349. São José dos Campos, 2002.

ANTUNES, A. F.B. & MULLER, M.V. Uso de imagens LANDSAT TM5 para mapeamento digital na área de proteção ambiental de Guaraqueçaba – PR. VIII Simpósio de Sensoriamento Remoto, Salvador, BA – 14 – 19 de abril de 1996.

BRISTOT, A. Planalto das Araucárias – um sistema em perigo de extinção? Agroecologia e Desenvolvimento Rural Sustentável. Revista. Porto Alegre. v. 2, n. 4, outubro/dezembro 2001.

BORBA, A. C. L. Avaliação de dados do Landsat 5 TM, componentes principais de mistura obtidos de mínimos quadrados e um método de conjuntos contínuos na estimativa de variáveis dendométricas de florestas de *Eucalyptus spp*, município de Barra do Ribeiro, RS. Dissertação de Mestrado, CEPSRM. 2002.

CHAVEZ, M. A. An improved dark-object subtraction technique for atmospheric scattering correction of multispectral data. Remote Sensing of Environment, 24 (3): 459-479, 1988.

CONGALTON, R.G.; ODERWALD, R.G.; MEAD, R.A. 1983. Assessing Landsat classification accuracy using discrete multivariate analysis statistical techniques. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 49(12): 1671-1678.

CONGALTON, R. G.; GREEN, K. Assessing the accuracy of remotely sensed data: principles and practices. New York: 1998. 137 p.

CURRAN, P. J. 1988. Principles of Remote Sensing, Longman, New York.

DAINESE, R. C. Sensoriamento Remoto e Geoprocessamento aplicado ao estudo temporal do uso da terra e na comparação entre classificação não-supervisionada e análise visual. Botucatu, SP. 211 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia – Energia na Agricultura) FCA.UNESP, 2001.

DUCATI, J.R., et al. Desenvolvimento de um sistema de zoneamento florestal aplicado ao manejo e planejamento florestal, através da utilização integrada de tecnologia de sensoriamento remoto e sistemas de informação geográfica. Relatório do projeto CEPSRM - UFRGS - Sindimadeira, 1999. 56p.

I POLLITI-RAMILO, G. A. Imagens TM/Landsat -5 da época de pré-plantio para previsão da área de culturas de verão. São José dos Campos. 183 p. (INPE-7116-TDI/668). Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto)- Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 1999.

JASPER, A. 1997. Determinação da Biodiversidade da Encosta do Planalto Meridional, na Região do Vale do Taquari – RS – BR- Lajeado, UNIVATES (Projeto de Pesquisa).

JASPER. A. & FELDES, L. 1999. Levantamento Fitossociológico de Linha Araçá – município de Progresso – RS – propriedade de Sr. Hans Wilhelm Cremer. Lajeado, UNIVATES (Projeto de Pesquisa).

JOHNSON, H. L. 1963. Photometric Systems, in Astronomical Techniques, Stars and Stellar Systems, University of Chicago Press.

KATO, M., et al. ASTER Data Utilization for Wetland Mapping and Forest Mapping. Asian Conference on Remote Sensing. November, 2001.

KURTZ, D. et al. Analisis espectral de montes forestales de la cuenca del Uruguay, Corrientes. (Argentina). IX Simpósio Latino Americano de Percepcion Remota. Argentina, 2000.

FONTANA, et al. Monitoramento e previsão da safra de soja 1999/2000 no Brasil. CESRM, UFRG. Relatório Técnico 005/01. 2001.

LEITE, P. F. & SOHN, S. 1986. Vegetação: as regiões fitoecológicas, sua natureza e seus recursos econômicos. Estudo fitogeográfico, In: Folha SG –ss Curitiba, parte da folha SG-21. Asunción e folha SG-23 Iguape, IBGE, no prelo.

LILLESAND, T.M.; KIEFER, R.W. Remote sensing and Image Interpretation. New York. John Wiley & Sons, 2 ed. 1987.

LIMA, S. DO C. et al. 1996. A Implantação de um sistema de Informação Geográfica para Subsidiar os Estudos de Susceptibilidade ambiental dos Agrossistemas nos Cerrados. VIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Salvador, BA – 14 -19 de abril de 1996.

MATHER, P. M. Computer processing of remotely-sensed images: an introduction. 2 ed. Chichester: John Wiley & Sons, 1999. 292 p.

MILANI, E. J. Evolução tectono-estratigráfica da bacia do Paraná e seu relacionamento com a Geodinâmica Fanerozoica do Gondwana Sul-Occidental. 1997. Tese (Doutorado em Geociências) – UFRGS, Porto Alegre.

MOREIRA, M.A. Fundamentos do sensoriamento remoto e metodologia de aplicação. São José dos Campos: INPE, 2001. 250 p.

MOREIRA, M.A. Fundamentos do sensoriamento remoto e metodologia de aplicação. São José dos Campos: INPE, 2003. 2ª ed. 307 p.

OLIVEIRA, Y., et al. The relationship between LANDSAT TM reflectance and structural variables for a Brazilian Pine plantation. IX Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2000.

- RAMBO, B. 1942. Fisionomia do Rio grande do Sul. São Leopoldo, UNISINOS Editora. 487 p.9.il.
- REMPEL, C. Aplicação do sensoriamento remoto para determinação da evolução da mata nativa da Bacia Hidrográfica do rio Forqueta - RS, entre 1985 e 1995. Dissertação de Mestrado. CEPSRM - UFRGS - 2000. 70p.
- RICHARDS, J. A. Remote sensing digital image analysis: an introduction. Berlin: Springer-Verlang, 1986. 281 p.
- ROSENFELD, G.H.; FITZPATRICK-LINZ, K. 1986. A coefficient of agreement as a measure of thematic classification accuracy. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 52 (2): 223-227.
- ROCHA, C. H. Geoprocessamento: tecnologia transdisciplinar. Ed. Do Autor. Juiz de Fora, MG., 2000.
- SCHOWENGERDT, R. A. 1983. *Techniques for Image Processing and Classification*. Londres – Inglaterra. Academic press Inc.
- SCHOWENGERDT, R. A. Remote sensing: models and methods for image processing. New York: academic Press, 1997. 2ª ed. 522 p.
- SMITS, P. C.; DELLEPIANE, S. G.; SCHOWENGERT, R. A. 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, p. 1461-86, 1999.
- TEIXEIRA, M. B. & COURA NETO, A. B. 1986. Mapa de vegetação do Rio Grande do Sul, in Relatório de Recursos Naturais do IBGE, p. 541-620 il.
- VAPNIK, V. N. (1999a). An overview of statistical learning theory. *IEEE Transactions on Neural Networks*, 10 (5), 988-999.
- VAPNIK, V. N. (1999b). The nature of statistical learning theory. In: M. Jordan, S. L. Lauritzen, J. F. Lawless, & V. Nadir (Eds.), *Statistics for engineering and information science*. New York: Springer, pp. 314.
- WILLWOCK, J. A. São Francisco de Paula e o Planalto das Araucárias: um ponto de vista geológico – conservação da biodiversidade e desenvolvimento sustentável de São Francisco de Paula. Porto Alegre: Editora PUCRS, 1998. p. 53-63.

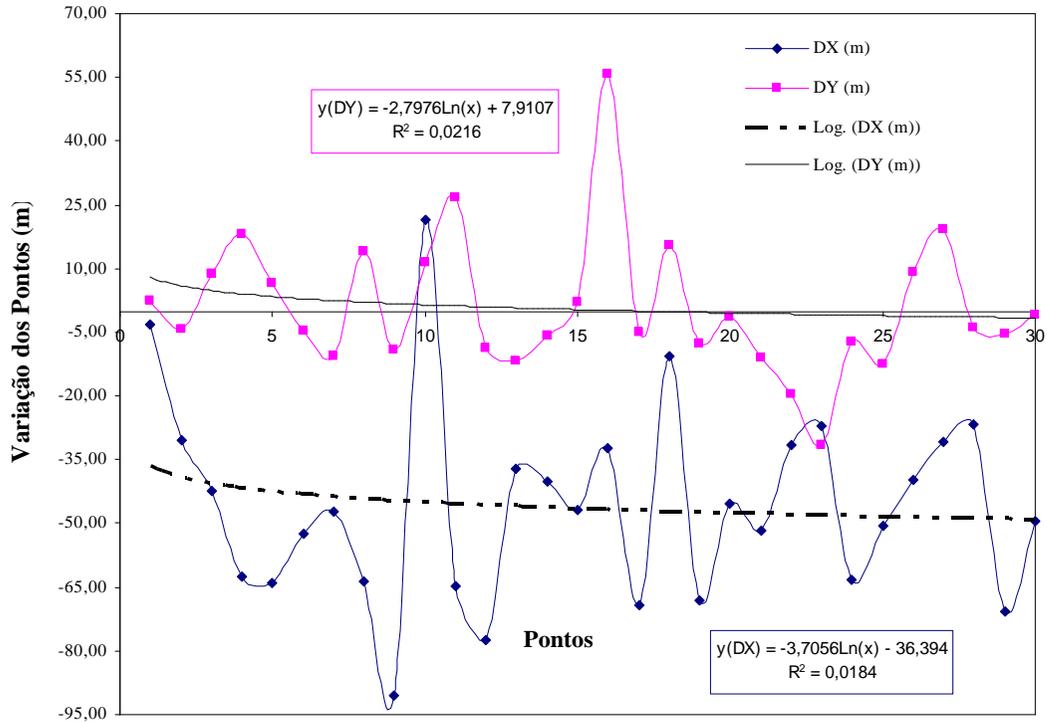
ANEXO 1

PONTOS AMARRADOS À ANTENA DO DEP. DE GEODÉSIA DA UFRGS
Datum: WGS84 Projeção: UTM 22 S

VARIAÇÃO ENTRE DADOS MEDIDOS E NA IMAGEM

Nome	X-medido (m)	Y-medido (m)	X-imagem (m)	Y-imagem (m)	ΔX (m)	ΔY (m)
A1	574048,1270	6768701,0253	574051,4182	6768698,6103	-3,2912	2,4150
A2	575201,6628	6767831,3042	575231,9600	6767835,5077	-30,2972	-4,2035
A5	577258,5707	6771364,9813	577300,9874	6771356,3209	-42,4167	8,6604
A8	586115,3243	6784765,9979	586177,7743	6784747,8817	-62,4500	18,1162
A9	587400,6903	6777793,2438	587464,7303	6777786,6069	-64,0400	6,6369
A13	578429,7886	6774836,0686	578482,3342	6774840,7602	-52,5456	-4,6916
A15	584237,7490	6786538,3982	584285,0730	6786549,0426	-47,3240	-10,6444
A16	597655,2360	6782285,4583	597718,8365	6782271,4154	-63,6005	14,0429
A17	596180,5126	6783625,4822	596270,9258	6783634,5568	-90,4132	-9,0746
A18	590633,1216	6784833,5775	590611,8096	6784822,3159	21,3120	11,2616
A20	587790,6287	6785547,3318	587855,5032	6785520,7664	-64,8745	26,5654
A22	589572,7874	6791707,7418	589650,1639	6791716,6071	-77,3765	-8,8653
A24	579985,9631	6791586,2672	580023,1857	6791597,9081	-37,2226	-11,6409
A25	576725,9927	6792492,7086	576766,2018	6792498,6061	-40,2091	-5,8975
A26	584771,6361	6788500,4100	584818,5972	6788498,2867	-46,9611	2,1233
A29	591004,1892	6796304,9949	591036,3423	6796249,0228	-32,1531	55,9721
A30	589211,3055	6795101,6176	589280,5999	6795106,5735	-69,2944	-4,9559
A33	585480,4929	6803042,3821	585491,1316	6803026,8360	-10,6387	15,5461
A35	583396,8309	6801421,7856	583464,9498	6801429,5845	-68,1189	-7,7989
A36	583418,0255	6805669,7484	583463,5101	6805671,0845	-45,4846	-1,3361
A38	581895,9062	6804206,9900	581947,4893	6804218,1341	-51,5831	-11,1441
A39	576499,8835	6803341,0864	576531,4934	6803360,8037	-31,6099	-19,7173
A40	576478,5758	6801600,6697	576505,5035	6801632,0905	-26,9277	-31,4208
A41	589353,7286	6807754,8839	589416,9848	6807762,3192	-63,2562	-7,4353
A42	590510,2169	6809157,9782	590560,7364	6809170,3169	-50,5195	-12,3387
A44	590704,9715	6817966,1981	590744,6391	6817957,0231	-39,6676	9,1750
P3	578763,8554	6779992,2619	578794,6847	6779973,1366	-30,8293	19,1253
P5	582639,7414	6785975,7530	582666,3892	6785979,6774	-26,6478	-3,9244
P7	589944,9495	6785616,2191	590015,5007	6785621,4409	-70,5512	-5,2218
P9	594770,7504	6783963,5675	594820,2362	6783964,4429	-49,4858	-0,8754

Varição dos Pontos Medidos Sobre a Imagem



	ΔX (m)	ΔY (m)
média	-45,6159	0,9485
desvio médio	17,5026	11,8839
desvio padrão	23,2225	16,1965

Latitude: ΔX (m) = - 45,6159 (\pm 23,2225)

Longitude: ΔY (m) = 0,9485 (\pm 16,1965)

ANEXO 2

Tabelas de Correlação

A – Correlações das Classes – Subsistema VNIR

1. Pinus manejo

Bd	Band 1	Band 2	Band 3
1	1.000000	0.860359	0.459409
2	0.860359	1.000000	0.302890
3	0.459409	0.302890	1.000000

2. Pinus jovem

Bd	Band 1	Band 2	Band 3
1	1.000000	0.913314	0.206659
2	0.913314	1.000000	-0.057821
3	0.206659	-0.057821	1.000000

3. Pinus adulto

Bd	Band 1	Band 2	Band 3
1	1.000000	0.726645	0.533626
2	0.726645	1.000000	0.236897
3	0.533626	0.236897	1.000000

4. Pinus velho

Bd	Band 1	Band 2	Band 3
1	1.000000	0.667018	0.455374
2	0.667018	1.000000	0.163152
3	0.455374	0.163152	1.000000

5. Eucalipto

Bd	Band 1	Band 2	Band 3
1	1.000000	0.652918	0.408660
2	0.652918	1.000000	-0.002188
3	0.408660	-0.002188	1.000000

6. Mata nativa

Bd	Band 1	Band 2	Band 3
1	1.000000	0.630033	0.409167
2	0.630033	1.000000	-0.145809
3	0.409167	-0.145809	1.000000

7. Área de Plantio

Bd	Band 1	Band 2	Band 3
1	1.000000	0.690830	0.031306
2	0.690830	1.000000	-0.587922
3	0.031306	-0.587922	1.000000

8. Solo Exposto

Bd	Band 1	Band 2	Band 3
1	1.000000	0.807640	0.285007
2	0.807640	1.000000	-0.120728
3	0.285007	-0.120728	1.000000

9. Nuvem

Bd	Band 1	Band 2	Band 3
1	1.000000	0.958269	0.853525
2	0.958269	1.000000	0.920609
3	0.853525	0.920609	1.000000

10. Sombra

Bd	Band 1	Band 2	Band 3
1	0.000000	0.000000	0.000000
2	0.000000	0.000000	0.000000
3	0.000000	0.000000	0.000000

11. Campo

Bd	Band 1	Band 2	Band 3
1	1.000000	0.827263	0.560524
2	0.827263	1.000000	0.221037
3	0.560524	0.221037	1.000000

12. Araucária

Bd	Band 1	Band 2	Band 3
1	1.000000	0.928633	0.851376
2	0.928633	1.000000	0.810361
3	0.851376	0.810361	1.000000

13. Área de queimadas

Bd	Band 1	Band 2	Band 3
1	1.000000	0.950570	0.897736
2	0.950570	1.000000	0.912214
3	0.897736	0.912214	1.000000

B– Correlações das Classes – Subsistema SWIR

1. Pinus manejo

Bd	Band 4	Band 5	Band 6	Band 7	Band 8	Band 9
4	1.000000	0.833755	0.899206	0.849514	0.826523	0.746305
5	0.833755	1.000000	0.888609	0.841114	0.834982	0.690898
6	0.899206	0.888609	1.000000	0.890086	0.872784	0.726517
7	0.849514	0.841114	0.890086	1.000000	0.927774	0.831614
8	0.826523	0.834982	0.872784	0.927774	1.000000	0.842415
9	0.746305	0.690898	0.726517	0.831614	0.842415	1.000000

2. Pinus jovem

Bd	Band 4	Band 5	Band 6	Band 7	Band 8	Band 9
4	1.000000	0.903378	0.911479	0.907360	0.889797	0.863603
5	0.903378	1.000000	0.960778	0.963385	0.952720	0.943386
6	0.911479	0.960778	1.000000	0.972534	0.970581	0.933309
7	0.907360	0.963385	0.972534	1.000000	0.972861	0.948842
8	0.889797	0.952720	0.970581	0.972861	1.000000	0.946293
9	0.863603	0.943386	0.933309	0.948842	0.946293	1.000000

3. Pinus adulto

Bd	Band 4	Band 5	Band 6	Band 7	Band 8	Band 9
4	1.000000	0.859127	0.920941	0.906588	0.906667	0.767363
5	0.859127	1.000000	0.894415	0.850809	0.869839	0.753360
6	0.920941	0.894415	1.000000	0.899961	0.910599	0.789157
7	0.906588	0.850809	0.899961	1.000000	0.899320	0.776818
8	0.906667	0.869839	0.910599	0.899320	1.000000	0.801767
9	0.767363	0.753360	0.789157	0.776818	0.801767	1.000000

4. Pinus velho

Bd	Band 4	Band 5	Band 6	Band 7	Band 8	Band 9
4	1.000000	0.859171	0.933425	0.918052	0.917935	0.826873
5	0.859171	1.000000	0.865793	0.848368	0.850956	0.702064
6	0.933425	0.865793	1.000000	0.907786	0.910911	0.780489
7	0.918052	0.848368	0.907786	1.000000	0.903948	0.810918
8	0.917935	0.850956	0.910911	0.903948	1.000000	0.814429
9	0.826873	0.702064	0.780489	0.810918	0.814429	1.000000

5. Eucalipto

Bd	Band 4	Band 5	Band 6	Band 7	Band 8	Band 9
4	1.000000	0.841496	0.936715	0.910917	0.882686	0.804392
5	0.841496	1.000000	0.935122	0.943089	0.939402	0.949324
6	0.936715	0.935122	1.000000	0.961449	0.945026	0.912523
7	0.910917	0.943089	0.961449	1.000000	0.967261	0.924263
8	0.882686	0.939402	0.945026	0.967261	1.000000	0.924262
9	0.804392	0.949324	0.912523	0.924263	0.924262	1.000000

6. Mata nativa

Bd	Band 4	Band 5	Band 6	Band 7	Band 8	Band 9
4	1.000000	0.810390	0.875854	0.857943	0.840205	0.646731
5	0.810390	1.000000	0.871707	0.830654	0.837515	0.732724
6	0.875854	0.871707	1.000000	0.868578	0.878396	0.716769
7	0.857943	0.830654	0.868578	1.000000	0.878792	0.766167
8	0.840205	0.837515	0.878396	0.878792	1.000000	0.791276
9	0.646731	0.732724	0.716769	0.766167	0.791276	1.000000

7. Área de Plantio

Bd	Band 4	Band 5	Band 6	Band 7	Band 8	Band 9
4	1.000000	0.812669	0.808788	0.774307	0.756022	0.763673
5	0.812669	1.000000	0.977108	0.978748	0.977528	0.977614
6	0.808788	0.977108	1.000000	0.978527	0.973552	0.971533
7	0.774307	0.978748	0.978527	1.000000	0.983061	0.982654
8	0.756022	0.977528	0.973552	0.983061	1.000000	0.983254
9	0.763673	0.977614	0.971533	0.982654	0.983254	1.000000

8.Solo Exposto

Bd	Band 4	Band 5	Band 6	Band 7	Band 8	Band 9
4	1.000000	0.827189	0.856383	0.821108	0.795577	0.781783
5	0.827189	1.000000	0.978618	0.975274	0.976370	0.966212
6	0.856383	0.978618	1.000000	0.975899	0.974407	0.967852
7	0.821108	0.975274	0.975899	1.000000	0.982033	0.969583
8	0.795577	0.976370	0.974407	0.982033	1.000000	0.977245
9	0.781783	0.966212	0.967852	0.969583	0.977245	1.000000

9. Nuvem

Bd	Band 4	Band 5	Band 6	Band 7	Band 8	Band 9
4	1.000000	0.974519	0.978150	0.973209	0.968585	0.957823
5	0.974519	1.000000	0.987519	0.978898	0.979383	0.974053
6	0.978150	0.987519	1.000000	0.982347	0.983478	0.978496
7	0.973209	0.978898	0.982347	1.000000	0.992814	0.986396
8	0.968585	0.979383	0.983478	0.992814	1.000000	0.992175
9	0.957823	0.974053	0.978496	0.986396	0.992175	1.000000

10. Sombra

Bd	Band 4	Band 5	Band 6	Band 7	Band 8	Band 9
4	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
5	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
6	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
7	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
8	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
9	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000

11. Campo

Bd	Band 4	Band 5	Band 6	Band 7	Band 8	Band 9
4	1.000000	0.692816	0.788191	0.698668	0.675133	0.610156
5	0.692816	1.000000	0.886649	0.867198	0.865846	0.816239
6	0.788191	0.886649	1.000000	0.899387	0.901496	0.819433
7	0.698668	0.867198	0.899387	1.000000	0.920492	0.858475
8	0.675133	0.865846	0.901496	0.920492	1.000000	0.867764
9	0.610156	0.816239	0.819433	0.858475	0.867764	1.000000

12. Araucária

Bd	Band 4	Band 5	Band 6	Band 7	Band 8	Band 9
4	1.000000	0.933985	0.950895	0.923470	0.917103	0.799713
5	0.933985	1.000000	0.923791	0.905080	0.901659	0.800029
6	0.950895	0.923791	1.000000	0.929502	0.929466	0.797890
7	0.923470	0.905080	0.929502	1.000000	0.925556	0.835009
8	0.917103	0.901659	0.929466	0.925556	1.000000	0.832171
9	0.799713	0.800029	0.797890	0.835009	0.832171	1.000000

13. Área de queimadas

Bd	Band 4	Band 5	Band 6	Band 7	Band 8	Band 9
4	1.000000	0.953667	0.966626	0.957775	0.941999	0.923983
5	0.953667	1.000000	0.991813	0.992194	0.992090	0.985142
6	0.966626	0.991813	1.000000	0.992774	0.990179	0.981114
7	0.957775	0.992194	0.992774	1.000000	0.994038	0.986017
8	0.941999	0.992090	0.990179	0.994038	1.000000	0.991512
9	0.923983	0.985142	0.981114	0.986017	0.991512	1.000000

C– Correlações das Classes – Subsistema (VNIR + SWIR)

1. Pinus manejo

Band	Band 1	Band 2	Band 3	Band 4	Band 5	Band 6	Band 7	Band 8	Band 9
1	1.000000	0.933134	0.669806	0.467868	0.290359	0.336765	0.358876	0.315115	0.161132
2	0.933134	1.000000	0.580766	0.440124	0.278865	0.313698	0.347027	0.312786	0.152387
3	0.669806	0.580766	1.000000	0.504043	0.258915	0.289577	0.274489	0.211720	0.073684
4	0.467868	0.440124	0.504043	1.000000	0.811017	0.869163	0.843915	0.810377	0.678080
5	0.290359	0.278865	0.258915	0.811017	1.000000	0.899550	0.848328	0.846545	0.739705
6	0.336765	0.313698	0.289577	0.869163	0.899550	1.000000	0.886478	0.872392	0.758277
7	0.358876	0.347027	0.274489	0.843915	0.848328	0.886478	1.000000	0.917753	0.806373
8	0.315115	0.312786	0.211720	0.810377	0.846545	0.872392	0.917753	1.000000	0.821866
9	0.161132	0.152387	0.073684	0.678080	0.739705	0.758277	0.806373	0.821866	1.000000

2. Pinus jovem

Band	Band 1	Band 2	Band 3	Band 4	Band 5	Band 6	Band 7	Band 8	Band 9
1	1.000000	0.866661	0.306268	0.550010	0.539441	0.560422	0.583450	0.586941	0.549568
2	0.866661	1.000000	-0.089929	0.616442	0.660801	0.681035	0.682974	0.695510	0.684243
3	0.306268	-0.089929	1.000000	0.023264	-0.156001	-0.139941	-0.112947	-0.129134	-0.193480
4	0.550010	0.616442	0.023264	1.000000	0.908636	0.933504	0.927532	0.908976	0.847502
5	0.539441	0.660801	-0.156001	0.908636	1.000000	0.965859	0.958758	0.957555	0.935568
6	0.560422	0.681035	-0.139941	0.933504	0.965859	1.000000	0.970507	0.969831	0.930697
7	0.583450	0.682974	-0.112947	0.927532	0.958758	0.970507	1.000000	0.975954	0.936670
8	0.586941	0.695510	-0.129134	0.908976	0.957555	0.969831	0.975954	1.000000	0.947474
9	0.549568	0.684243	-0.193480	0.847502	0.935568	0.930697	0.936670	0.947474	1.000000

3. Pinus adulto

Band	Band 1	Band 2	Band 3	Band 4	Band 5	Band 6	Band 7	Band 8	Band 9
1	1.000000	0.789289	0.523015	0.343102	0.333588	0.401634	0.316655	0.325796	0.249294
2	0.789289	1.000000	0.215299	0.444378	0.422870	0.513551	0.443156	0.465940	0.387844
3	0.523015	0.215299	1.000000	0.232568	0.218105	0.211824	0.168266	0.137048	0.118855
4	0.343102	0.444378	0.232568	1.000000	0.794191	0.888262	0.849147	0.840285	0.661868
5	0.333588	0.422870	0.218105	0.794191	1.000000	0.861000	0.819623	0.820822	0.753922
6	0.401634	0.513551	0.211824	0.888262	0.861000	1.000000	0.857693	0.867088	0.723518
7	0.316655	0.443156	0.168266	0.849147	0.819623	0.857693	1.000000	0.863177	0.734170
8	0.325796	0.465940	0.137048	0.840285	0.820822	0.867088	0.863177	1.000000	0.755123
9	0.249294	0.387844	0.118855	0.661868	0.753922	0.723518	0.734170	0.755123	1.000000

4. Pinus velho

Band	Band 1	Band 2	Band 3	Band 4	Band 5	Band 6	Band 7	Band 8	Band 9
1	1.000000	0.821099	0.664228	0.527518	0.397068	0.450529	0.445933	0.430063	0.340532
2	0.821099	1.000000	0.458445	0.492766	0.457665	0.480429	0.458225	0.452392	0.313991
3	0.664228	0.458445	1.000000	0.503896	0.259283	0.273614	0.292447	0.267124	0.403439
4	0.527518	0.492766	0.503896	1.000000	0.809418	0.878791	0.844209	0.838086	0.687567
5	0.397068	0.457665	0.259283	0.809418	1.000000	0.841408	0.800532	0.813350	0.612023
6	0.450529	0.480429	0.273614	0.878791	0.841408	1.000000	0.854205	0.859847	0.642302
7	0.445933	0.458225	0.292447	0.844209	0.800532	0.854205	1.000000	0.859868	0.697226
8	0.430063	0.452392	0.267124	0.838086	0.813350	0.859847	0.859868	1.000000	0.706006
9	0.340532	0.313991	0.403439	0.687567	0.612023	0.642302	0.697226	0.706006	1.000000

5. Eucalipto

Band	Band 1	Band 2	Band 3	Band 4	Band 5	Band 6	Band 7	Band 8	Band 9
1	1.000000	0.888428	0.181363	0.496232	0.554639	0.522772	0.582627	0.574604	0.487853
2	0.888428	1.000000	0.062416	0.540252	0.577321	0.551762	0.580602	0.579381	0.546185
3	0.181363	0.062416	1.000000	0.186215	0.148400	0.133278	0.112082	0.107002	0.071278
4	0.496232	0.540252	0.186215	1.000000	0.921463	0.955953	0.933027	0.918738	0.847946
5	0.554639	0.577321	0.148400	0.921463	1.000000	0.960241	0.960625	0.967563	0.934698
6	0.522772	0.551762	0.133278	0.955953	0.960241	1.000000	0.960107	0.957843	0.912273
7	0.582627	0.580602	0.112082	0.933027	0.960625	0.960107	1.000000	0.968931	0.910413
8	0.574604	0.579381	0.107002	0.918738	0.967563	0.957843	0.968931	1.000000	0.928325
9	0.487853	0.546185	0.071278	0.847946	0.934698	0.912273	0.910413	0.928325	1.000000

6. Mata nativa

Band	Band 1	Band 2	Band 3	Band 4	Band 5	Band 6	Band 7	Band 8	Band 9
1	1.000000	0.650673	0.442721	0.471315	0.327494	0.395462	0.373117	0.346572	0.211679
2	0.650673	1.000000	-0.154669	0.494921	0.535378	0.568096	0.532741	0.555131	0.487442
3	0.442721	-0.154669	1.000000	0.261173	-0.040893	0.033332	0.048841	-0.008646	-0.131328
4	0.471315	0.494921	0.261173	1.000000	0.802218	0.891312	0.872406	0.858063	0.678123
5	0.327494	0.535378	-0.040893	0.802218	1.000000	0.881189	0.845859	0.846597	0.772557
6	0.395462	0.568096	0.033332	0.891312	0.881189	1.000000	0.888516	0.894383	0.753184
7	0.373117	0.532741	0.048841	0.872406	0.845859	0.888516	1.000000	0.895740	0.789171
8	0.346572	0.555131	-0.008646	0.858063	0.846597	0.894383	0.895740	1.000000	0.808024
9	0.211679	0.487442	-0.131328	0.678123	0.772557	0.753184	0.789171	0.808024	1.000000

7. Área de Plantio

Band	Band 1	Band 2	Band 3	Band 4	Band 5	Band 6	Band 7	Band 8	Band 9
1	1.000000	0.812003	0.120639	0.512474	0.409532	0.421493	0.391692	0.358326	0.352212
2	0.812003	1.000000	-0.385378	0.521167	0.611374	0.627532	0.613102	0.600355	0.593200
3	0.120639	-0.385378	1.000000	-0.162238	-0.535309	-0.528956	-0.566684	-0.593577	-0.596040
4	0.512474	0.521167	-0.162238	1.000000	0.809660	0.839909	0.789147	0.744483	0.727206
5	0.409532	0.611374	-0.535309	0.809660	1.000000	0.977333	0.977380	0.972814	0.967857
6	0.421493	0.627532	-0.528956	0.839909	0.977333	1.000000	0.975497	0.969011	0.962556
7	0.391692	0.613102	-0.566684	0.789147	0.977380	0.975497	1.000000	0.982335	0.971767
8	0.358326	0.600355	-0.593577	0.744483	0.972814	0.969011	0.982335	1.000000	0.979157
9	0.352212	0.593200	-0.596040	0.727206	0.967857	0.962556	0.971767	0.979157	1.000000

8. Solo Exposto

Band	Band 1	Band 2	Band 3	Band 4	Band 5	Band 6	Band 7	Band 8	Band 9
1	1.000000	0.836640	0.409166	0.092656	0.131236	0.124599	0.150189	0.186259	0.225462
2	0.836640	1.000000	0.015747	0.331744	0.431169	0.423398	0.448193	0.483303	0.508128
3	0.409166	0.015747	1.000000	-0.190049	-0.425387	-0.409130	-0.424917	-0.436154	-0.433060
4	0.092656	0.331744	-0.190049	1.000000	0.865478	0.893819	0.854671	0.812544	0.765250
5	0.131236	0.431169	-0.425387	0.865478	1.000000	0.981213	0.977326	0.972834	0.950797
6	0.124599	0.423398	-0.409130	0.893819	0.981213	1.000000	0.976840	0.967266	0.944240
7	0.150189	0.448193	-0.424917	0.854671	0.977326	0.976840	1.000000	0.982671	0.958167
8	0.186259	0.483303	-0.436154	0.812544	0.972834	0.967266	0.982671	1.000000	0.974306
9	0.225462	0.508128	-0.433060	0.765250	0.950797	0.944240	0.958167	0.974306	1.000000

9. Nuvem

Band	Band 1	Band 2	Band 3	Band 4	Band 5	Band 6	Band 7	Band 8	Band 9
1	1.000000	0.971830	0.894266	0.806881	0.862398	0.877796	0.877083	0.894009	0.897123
2	0.971830	1.000000	0.883621	0.841656	0.891341	0.908831	0.911245	0.926266	0.922989
3	0.894266	0.883621	1.000000	0.658954	0.720256	0.743952	0.748666	0.775556	0.774225
4	0.806881	0.841656	0.658954	1.000000	0.980245	0.974161	0.966439	0.947242	0.940935
5	0.862398	0.891341	0.720256	0.980245	1.000000	0.992076	0.985722	0.977662	0.974007
6	0.877796	0.908831	0.743952	0.974161	0.992076	1.000000	0.989876	0.985700	0.982455
7	0.877083	0.911245	0.748666	0.966439	0.985722	0.989876	1.000000	0.993414	0.989328
8	0.894009	0.926266	0.775556	0.947242	0.977662	0.985700	0.993414	1.000000	0.995033
9	0.897123	0.922989	0.774225	0.940935	0.974007	0.982455	0.989328	0.995033	1.000000

10. Sombra

Band	Band 1	Band 2	Band 3	Band 4	Band 5	Band 6	Band 7	Band 8	Band 9
1	1.000000	1.000000	1.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
2	1.000000	1.000000	1.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
3	1.000000	1.000000	1.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
4	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
5	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
6	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000	0.000000	0.000000	0.000000
7	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000	0.000000	0.000000
8	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000	0.000000
9	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000

11. Campo

Band	Band 1	Band 2	Band 3	Band 4	Band 5	Band 6	Band 7	Band 8	Band 9
1	1.000000	0.797509	0.554582	0.595296	0.343042	0.439892	0.386947	0.379740	0.242443
2	0.797509	1.000000	0.145156	0.715311	0.598608	0.674961	0.622200	0.613833	0.511760
3	0.554582	0.145156	1.000000	0.217789	-0.244751	-0.168228	-0.216045	-0.234039	-0.304036
4	0.595296	0.715311	0.217789	1.000000	0.694155	0.787379	0.711975	0.681731	0.581410
5	0.343042	0.598608	-0.244751	0.694155	1.000000	0.916641	0.901719	0.915883	0.870322
6	0.439892	0.674961	-0.168228	0.787379	0.916641	1.000000	0.911482	0.920032	0.849102
7	0.386947	0.622200	-0.216045	0.711975	0.901719	0.911482	1.000000	0.931293	0.874199
8	0.379740	0.613833	-0.234039	0.681731	0.915883	0.920032	0.931293	1.000000	0.905264
9	0.242443	0.511760	-0.304036	0.581410	0.870322	0.849102	0.874199	0.905264	1.000000

12. Araucária

Band	Band 1	Band 2	Band 3	Band 4	Band 5	Band 6	Band 7	Band 8	Band 9
1	1.000000	0.942058	0.783952	0.705667	0.645804	0.676815	0.657642	0.652643	0.550577
2	0.942058	1.000000	0.649555	0.661376	0.631882	0.647860	0.637247	0.640327	0.548903
3	0.783952	0.649555	1.000000	0.672384	0.540915	0.618571	0.579802	0.563925	0.486026
4	0.705667	0.661376	0.672384	1.000000	0.919814	0.960402	0.943721	0.936188	0.828631
5	0.645804	0.631882	0.540915	0.919814	1.000000	0.924603	0.933704	0.927014	0.864790
6	0.676815	0.647860	0.618571	0.960402	0.924603	1.000000	0.937699	0.938067	0.839100
7	0.657642	0.637247	0.579802	0.943721	0.933704	0.937699	1.000000	0.949247	0.878236
8	0.652643	0.640327	0.563925	0.936188	0.927014	0.938067	0.949247	1.000000	0.873758
9	0.550577	0.548903	0.486026	0.828631	0.864790	0.839100	0.878236	0.873758	1.000000

13. Área de queimadas

Band	Band 1	Band 2	Band 3	Band 4	Band 5	Band 6	Band 7	Band 8	Band 9
1	1.000000	0.952647	0.874580	0.545574	0.370142	0.398361	0.386032	0.364900	0.322751
2	0.952647	1.000000	0.877025	0.662303	0.484630	0.514452	0.504810	0.484806	0.441190
3	0.874580	0.877025	1.000000	0.517337	0.287708	0.324824	0.308335	0.278440	0.236594
4	0.545574	0.662303	0.517337	1.000000	0.922573	0.944531	0.936875	0.919729	0.891346
5	0.370142	0.484630	0.287708	0.922573	1.000000	0.989165	0.988356	0.989207	0.981340
6	0.398361	0.514452	0.324824	0.944531	0.989165	1.000000	0.989893	0.987561	0.974961
7	0.386032	0.504810	0.308335	0.936875	0.988356	0.989893	1.000000	0.993473	0.982363
8	0.364900	0.484806	0.278440	0.919729	0.989207	0.987561	0.993473	1.000000	0.987819
9	0.322751	0.441190	0.236594	0.891346	0.981340	0.974961	0.982363	0.987819	1.000000