

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO  
INSTITUTO DE CIÊNCIAS EXATAS E DA TERRA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FÍSICA E MEIO AMBIENTE

**UMA ANÁLISE DA REFLEXÃO ESPECTRAL DE UMA  
FLORESTA DE TRANSIÇÃO A PARTIR DE IMAGENS  
MULTITEMPORAIS DO IKONOS**

SÉRGIO WAGNER GRIPP DA SILVEIRA

Orientador:  
DR. SHOZO SHIRAIWA

CUIABÁ, JULHO DE 2004

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO  
INSTITUTO DE CIÊNCIAS EXATAS E DA TERRA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FÍSICA E MEIO AMBIENTE

**UMA ANÁLISE DA REFLEXÃO ESPECTRAL DE UMA  
FLORESTA DE TRANSIÇÃO A PARTIR DE IMAGENS  
MULTITEMPORAIS DO IKONOS**

SÉRGIO WAGNER GRIPP DA SILVEIRA

*Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Física e Meio Ambiente da Universidade Federal de Mato Grosso, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Física e Meio Ambiente.*

Orientador:  
DR. SHOZO SHIRAIWA

CUIABÁ, JULHO DE 2004

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO  
INSTITUTO DE CIÊNCIAS EXATAS E DA TERRA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FÍSICA E MEIO AMBIENTE

**Título: UMA ANÁLISE DA REFLEXÃO ESPECTRAL DE UMA FLORESTA DE TRANSIÇÃO  
A PARTIR DE IMAGENS MULTITEMPORAIS DO IKONOS**

**Autor: SÉRGIO WAGNER GRIPP DA SILVEIRA**

Dissertação defendida e aprovada em \_\_\_\_\_ de \_\_\_\_\_ de 2004 pela comissão julgadora:

---

Orientador  
Universidade Federal de Mato Grosso

---

Examinador Interno  
Universidade Federal de Mato Grosso

---

Examinador Externo  
Universidade Federal de Mato Grosso

Dedico este trabalho ao Me. Mauro Mas-  
sao Shiota Hayashi (*In Memoriam*) e a todos  
que direta ou indiretamente me ajudaram na  
realização do mesmo.

# Agradecimentos

Ao SENHOR, que me sustenta e me dá forças. A Ele, que tem me iluminado.

À minha esposa, Deize, e aos meus filhos, David e Dayanne, pelo apoio e compreensão.

Ao Prof. Dr. Shozo Shiraiwa por todo apoio, incentivo, orientação e dedicação.

Ao coordenador do Programa de Pós-Graduação em Física e Meio Ambiente, Prof. Dr. José de Souza Nogueira, o Paraná, por me conceder esta oportunidade, pelo apoio e incentivo.

Ao Me. Mauro Massao Shiota Hayashi (*In Memoriam*) por sua grande contribuição durante todo o curso. Tendo contribuído com sua vasta experiência, com as montagens de equipamentos, com os programas, planilhas de cálculos e sua amizade.

Ao Prof. Dr. José de Holanda Campelo Júnior por me introduzir ao campo da Climatologia teórica e experimental.

Ao Prof. Dr. Peter Zeilhofer pelas importantes aulas de sensoriamento remoto e pela ajuda na revisão deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Nicolau Priante Filho, pelo incentivo, pelo apoio e pelas importantes aulas de estatística.

Ao Prof. Dr. Sérgio Roberto de Paulo pelas aulas de teoria do caos.

A todos os professores do Programa de Pós-graduação em Física e Meio Ambiente.

Ao CNPq/PADCT/INSTITUTOS DO MILÊNIO, pelo suporte financeiro. Projeto: “Milênio LBA-Mudanças de Usos de Solo na Amazônia: Implicações Climáticas e na Ciclagem de Carbono.” Processo n°: 62.0056/01-0.

À Dr. Luciana Sanches pela ajuda com os cálculos de produção de serrapilheira, com os dados coletados em campo e pela revisão bibliográfica sobre este tema.

Ao Prof. Dr. Alberto Sebastião de Arruda por me iniciar no mundo do  $\text{\LaTeX}$ .

Ao chefe do Núcleo Regional de Cuiabá, Sr. Jair Pereira da Silva, e ao Eng. Glauber Paz Miranda, ambos do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, pelo apoio no tocante à flexibilização do meu horário de trabalho, sem a qual não seria possível a realização deste

curso.

Ao Dr. Pawel Rozenfeld do Centro de Controle de Satélites do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais de São José dos Campos – SP, que sempre me incentivou em meus estudos.

A todos os colegas do curso de Mestrado em Física e Meio Ambiente, pela amizade e compartilhamento de seus conhecimentos, em especial a George Sanches Suli, pela grande contribuição no tocante ao sensoriamento remoto, ao GIS, às coletas de dados no campo de Sinop – MT e à confecção da Figura 11.

À secretária da Coordenação do Programa de Pós-graduação em Física e Meio Ambiente, Soilce Beatriz de Paula Carrilho, por toda dedicação referente às atividades de secretaria e por toda a amizade.

Ao Sr. Luiz Carlos da Silva Nascimento, da Estação de Rastreo e Gravação de Imagens do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, pelo apoio ao fornecimento das imagens do satélite CBERS-2.

*E apliquei o meu coração a inquirir e a investigar com sabedoria a respeito de tudo quanto se faz debaixo do céu; essa enfadonha ocupação deu Deus aos filhos dos homens para nela se exercitarem. E apliquei o coração a conhecer a sabedoria e a conhecer os desvarios e as loucuras; e vim a saber que também isso era desejo vão. Porque na muita sabedoria há muito enfado; e o que aumenta o conhecimento aumenta a tristeza.*

*Eclesiastes 1:13, 17 e 18.*

# Sumário

|                                                                       |         |
|-----------------------------------------------------------------------|---------|
| <b>Lista de Figuras</b>                                               | p. x    |
| <b>Lista de Tabelas</b>                                               | p. xii  |
| <b>Lista de Siglas</b>                                                | p. xiii |
| <b>Resumo</b>                                                         | p. xv   |
| <b>Abstract</b>                                                       | p. xvi  |
| <b>1 Introdução</b>                                                   | p. 1    |
| <b>2 Revisão Bibliográfica</b>                                        | p. 4    |
| 2.1 Radiação eletromagnética . . . . .                                | p. 4    |
| 2.2 Interações da radiação eletromagnética com a superfície . . . . . | p. 6    |
| 2.3 Interações da radiação eletromagnética com a atmosfera . . . . .  | p. 7    |
| 2.3.1 Absorção . . . . .                                              | p. 8    |
| 2.3.2 Espalhamento . . . . .                                          | p. 9    |
| 2.3.2.1 Espalhamento Rayleigh . . . . .                               | p. 9    |
| 2.3.2.2 Espalhamento Mie . . . . .                                    | p. 9    |
| 2.3.2.3 Espalhamento não-seletivo . . . . .                           | p. 9    |
| 2.4 Sistemas de sensoriamento remoto . . . . .                        | p. 9    |
| 2.4.1 Classificação dos sistemas sensores . . . . .                   | p. 10   |
| 2.4.1.1 Quanto à fonte de radiação . . . . .                          | p. 10   |
| 2.4.1.2 Quanto ao princípio de funcionamento . . . . .                | p. 10   |



|          |                                                                       |       |
|----------|-----------------------------------------------------------------------|-------|
| 2.4.1.3  | Quanto ao tipo de produto . . . . .                                   | p. 10 |
| 2.4.2    | Características de um sensor . . . . .                                | p. 11 |
| 2.4.2.1  | Resolução espacial . . . . .                                          | p. 11 |
| 2.4.2.2  | Resolução espectral . . . . .                                         | p. 11 |
| 2.4.2.3  | Resolução temporal . . . . .                                          | p. 11 |
| 2.4.2.4  | Resolução radiométrica . . . . .                                      | p. 12 |
| 2.4.3    | Os sensores usados na série Landsat . . . . .                         | p. 12 |
| 2.4.4    | Os sensores usados no CBERS . . . . .                                 | p. 14 |
| 2.4.5    | Os sensores usados no IKONOS . . . . .                                | p. 15 |
| 2.5      | Correção atmosférica . . . . .                                        | p. 16 |
| 2.5.1    | Modelo de transferência radiativo . . . . .                           | p. 16 |
| 2.5.2    | Técnica da sombra . . . . .                                           | p. 17 |
| 2.5.3    | Técnica da subtração de objetos escuros . . . . .                     | p. 17 |
| 2.6      | Índices de vegetação . . . . .                                        | p. 17 |
| 2.6.1    | VI . . . . .                                                          | p. 18 |
| 2.6.2    | NDVI . . . . .                                                        | p. 18 |
| 2.6.3    | ARVI . . . . .                                                        | p. 18 |
| 2.7      | Serrapilheira . . . . .                                               | p. 19 |
| 2.7.1    | Definição . . . . .                                                   | p. 19 |
| 2.7.2    | A importância ecológica da serrapilheira . . . . .                    | p. 19 |
| 2.7.3    | Propriedades espectrais da serrapilheira . . . . .                    | p. 20 |
| <b>3</b> | <b>Materiais e métodos</b>                                            | p. 22 |
| 3.1      | Área de estudo . . . . .                                              | p. 22 |
| 3.2      | Métodos . . . . .                                                     | p. 23 |
| 3.2.1    | Produção de serrapilheira . . . . .                                   | p. 23 |
| 3.2.2    | Medida da localização das caixas coletoras de serrapilheira . . . . . | p. 23 |

|          |                                                                              |       |
|----------|------------------------------------------------------------------------------|-------|
| 3.2.3    | Geoprocessamento . . . . .                                                   | p. 23 |
| 3.2.4    | Georreferenciamento das imagens . . . . .                                    | p. 25 |
| 3.2.5    | Correção radiométrica . . . . .                                              | p. 25 |
| 3.2.5.1  | Radiância espectral . . . . .                                                | p. 25 |
| 3.2.5.2  | Reflectância planetária . . . . .                                            | p. 26 |
| 3.2.6    | Correção atmosférica . . . . .                                               | p. 26 |
| 3.2.7    | Simulação atmosférica . . . . .                                              | p. 28 |
| 3.2.8    | Análise espectral das imagens IKONOS . . . . .                               | p. 28 |
| 3.2.9    | Produção de serrapilheira versus reflectância, NDVI e ARVI . . . . .         | p. 29 |
| <b>4</b> | <b>Resultados e discussões</b>                                               | p. 30 |
| 4.1      | Produção de serrapilheira (2001 e 2002) . . . . .                            | p. 30 |
| 4.2      | Análise dos cenários . . . . .                                               | p. 31 |
| 4.3      | Correção atmosférica . . . . .                                               | p. 36 |
| 4.4      | Variação sazonal, NDVI e ARVI . . . . .                                      | p. 37 |
| 4.4.1    | NDVI . . . . .                                                               | p. 38 |
| 4.4.2    | ARVI . . . . .                                                               | p. 40 |
| 4.5      | Reflectâncias na faixa espectral do vermelho e do NIR, NDVI e ARVI . . . . . | p. 41 |
| 4.6      | Reflectância, NDVI e ARVI versus produção de serrapilheira . . . . .         | p. 47 |
| <b>5</b> | <b>Conclusões</b>                                                            | p. 50 |
|          | <b>Referências</b>                                                           | p. 52 |
|          | <b>Apêndice A – Programa LEGAL (Spring)</b>                                  | p. 55 |
| A.1      | Radiância espectral 2000 . . . . .                                           | p. 55 |
| A.2      | Radiância espectral 2001 e 2002 . . . . .                                    | p. 56 |
| A.3      | Reflectâncias com correção atmosférica . . . . .                             | p. 56 |

|     |                           |       |
|-----|---------------------------|-------|
| A.4 | Geração de NDVI . . . . . | p. 59 |
|-----|---------------------------|-------|

# Lista de Figuras

|    |                                                                                                                 |       |
|----|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| 1  | O espectro eletromagnético . . . . .                                                                            | p. 4  |
| 2  | Distribuição espectral de energia de um corpo negro . . . . .                                                   | p. 5  |
| 3  | Curva espectral da vegetação, da água e do solo . . . . .                                                       | p. 6  |
| 4  | Influência da atmosfera em sensoriamento remoto . . . . .                                                       | p. 7  |
| 5  | Relação entre fontes de energia as características da absorção atmosférica . .                                  | p. 8  |
| 6  | Resposta espectral relativa da banda pancromática do IKONOS . . . . .                                           | p. 15 |
| 7  | Resposta espectral relativa das bandas multiespectrais do IKONOS . . . . .                                      | p. 16 |
| 8  | Técnica da sombra para correção atmosférica . . . . .                                                           | p. 17 |
| 9  | Reflectância espectral das serrapilheiras e dos solos em SWIR . . . . .                                         | p. 21 |
| 10 | Localização da área de estudo . . . . .                                                                         | p. 22 |
| 11 | Disposição das caixas coletoras de serrapilheira e da torre de coleta de dados<br>micrometeorológicos . . . . . | p. 24 |
| 12 | Produção de serrapilheira no ano de 2001 . . . . .                                                              | p. 30 |
| 13 | Produção de serrapilheira no ano de 2002 . . . . .                                                              | p. 31 |
| 14 | Comparações das reflectâncias médias na faixa do vermelho para vários cenários                                  | p. 32 |
| 15 | Comparações das reflectâncias médias na faixa do infravermelho próximo<br>para vários cenários . . . . .        | p. 32 |
| 16 | Comparações dos NDVI's para vários cenários . . . . .                                                           | p. 33 |
| 17 | Boxplot para comparações dos NDVI's para vários cenários . . . . .                                              | p. 33 |
| 18 | Comparações dos ARVI's para vários cenários . . . . .                                                           | p. 34 |
| 19 | Boxplot para comparações dos ARVI's para vários cenários . . . . .                                              | p. 35 |

|    |                                                                                                                                                       |       |
|----|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| 20 | Comparação entre as reflectâncias do dossel, na faixa espectral azul, obtidas a partir da correção atmosférica feita pelos métodos DOS e 6S . . . . . | p. 36 |
| 21 | Boxplot de reflectância azul de pixels de referência do asfalto para os três anos                                                                     | p. 37 |
| 22 | Valores do NDVI para os três anos obtidos a partir das imagens com correção atmosférica . . . . .                                                     | p. 38 |
| 23 | Curvas de reflectância espectral de folhas verdes e senescentes. Adaptada de: Moreira (2001), p. 82. . . . .                                          | p. 39 |
| 24 | Razão entre a radiação fotossinteticamente ativa refletida pelo dossel e a incidente ( $PAR_r/PAR_i$ ) para o ano de 2001 . . . . .                   | p. 40 |
| 25 | Valores do ARVI para os três anos obtidos a partir das imagens com correção atmosférica . . . . .                                                     | p. 41 |
| 26 | Reflectância aparente para a faixa do vermelho. Anos: 2000, 2001 e 2002 . .                                                                           | p. 42 |
| 27 | Reflectância para a faixa do vermelho, com correção atmosférica. Anos: 2000, 2001 e 2002 . . . . .                                                    | p. 42 |
| 28 | Reflectância aparente para a faixa do infravermelho próximo. Anos: 2000, 2001 e 2002 . . . . .                                                        | p. 43 |
| 29 | Reflectância para a faixa do infravermelho próximo, com correção atmosférica. Anos: 2000, 2001 e 2002 . . . . .                                       | p. 43 |
| 30 | Valores do NDVI sem correção atmosférica. Anos: 2000, 2001 e 2002 . . . .                                                                             | p. 44 |
| 31 | NDVI com correção atmosférica. Anos: 2000, 2001 e 2002 . . . . .                                                                                      | p. 44 |
| 32 | ARVI com correção atmosférica. Anos: 2000, 2001 e 2002 . . . . .                                                                                      | p. 45 |
| 33 | Imagens NDVI com correções atmosféricas (2000, 2001 e 2002) . . . . .                                                                                 | p. 46 |
| 34 | Relação entre a reflectância NIR da imagem IKONOS com a produção de serrapilheira . . . . .                                                           | p. 47 |
| 35 | Relação entre a reflectância do vermelho da imagem IKONOS com a produção de serrapilheira . . . . .                                                   | p. 48 |
| 36 | Relação entre o NDVI da imagem IKONOS e a produção de serrapilheira . .                                                                               | p. 48 |
| 37 | Relação entre o ARVI da imagem IKONOS e a produção de serrapilheira . .                                                                               | p. 49 |

## Lista de Tabelas

|    |                                                                            |       |
|----|----------------------------------------------------------------------------|-------|
| 1  | Sensores usados nas missões de 1 a 6 da série Landsat . . . . .            | p. 13 |
| 2  | Bandas espectrais do sensor ETM+ . . . . .                                 | p. 13 |
| 3  | Bandas espectrais do sensor CCD do CBERS . . . . .                         | p. 14 |
| 4  | Bandas espectrais do sensor IR-MSS do CBERS . . . . .                      | p. 14 |
| 5  | Bandas espectrais do sensor WFI do CBERS . . . . .                         | p. 14 |
| 6  | Bandas espectrais do satélite IKONOS . . . . .                             | p. 15 |
| 7  | Lista das imagens IKONOS usadas neste trabalho . . . . .                   | p. 24 |
| 8  | Coeficientes de calibração radiométrica IKONOS (imagem de 11 bits) . . . . | p. 25 |
| 9  | Valores de $ESUN_{\lambda}$ para o Landsat 7 e o IKONOS . . . . .          | p. 26 |
| 10 | Cenários com os vários modelos para simulação atmosférica . . . . .        | p. 28 |
| 11 | Médias e desvios (S.D.) dos NDVI's para os vários cenários . . . . .       | p. 34 |
| 12 | Médias e desvios (S.D.) dos ARVI's . . . . .                               | p. 35 |
| 13 | Variação dos valores do NDVI e do ARVI em função dos cenários . . . . .    | p. 35 |
| 14 | Parâmetros para correção atmosférica das imagens IKONOS . . . . .          | p. 37 |
| 15 | Média dos NDVI's e desvios padrões para imagens com correção atmosférica   | p. 38 |
| 16 | Média dos ARVI's e desvios padrões para imagens com correção atmosférica   | p. 41 |

# Lista de Siglas

LBA – *Large Scale Biosphere-Atmosphere Experiment in Amazonia* – Experimento de Grande Escala da Biosfera-Atmosfera na Amazônia

PAR – *Photosynthetically-Active Radiation* – Radiação Fotossinteticamente Ativa

IR – *Infrared* – Infravermelho

NIR – *near-IR* – infravermelho próximo

MIR – *mid-IR* – infravermelho médio

TIR – *thermal-IR* – infravermelho térmico

TM – *Thematic Mapper* – Mapeador Temático

ETM+ – *Enhanced Thematic Mapper Plus* – Mapeador Temático Otimizado Plus

WFI – *Wide Field Imager* – Imageador de Campo Largo

CCD – *Charge-Coupled Device*

PAN – *Panchromatic* – Pancromático

MS – *Multispectral* – Multiespectral

SAR – *Synthetic Aperture Radar* – Radar de Abertura Sintética

RAR – *Real Aperture Radar* – Radar de Abertura Real

RBV – *Return Beam Vidicon*

MSS – *Multispectral Scanner* – Escanerizador Multiespectral

ETM – *Enhanced Thematic Mapper* – Mapeador Temático Otimizado

CBERS – *China-Brazil Earth Resource Satellite* – Satélite Sino-Brasileiro de Recursos Terrestres

IRMSS – *InfraRed Multispectral Scanner Subsystem* – Subsistema Escanerizador Multiespectral Infravermelho

VI – *Vegetation Index* – Índice de Vegetação Simples

NDVI – *Normalized difference vegetation index* – Índice de Vegetação Diferença Normalizada

ARVI – *Atmospherically Resistant Vegetation Index* – Índice de Vegetação Atmosfericamente Resistente

CAI – *Celulose Absorption Index* – Índice de Absorção da Celulose

SWIR – *Shortwave Infrared* – Infravermelho de ondas curtas

GRIB – *Gridded binary*

DN – *Digital Numbers* – Números Digitais (ou valores digitais)

EVI – *Enhanced Vegetation Index* – Índice de Vegetação Realçado

MTFC – *Modulation Transfer Function Compensation* – Compensação da Função de Transferência de Modulação



# Resumo

**SILVEIRA, S. W. G. Uma análise da reflexão espectral de uma floresta de transição a partir de imagens multitemporais do IKONOS.** Cuiabá, 2004. 78 p. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Ciências Exatas e da Terra, Universidade Federal de Mato Grosso.

Este trabalho apresenta uma análise da variação da reflexão espectral de uma floresta de transição com o cerrado, situado na região ao norte de Sinop – MT, utilizando imagens do sistema sensor IKONOS dos anos 2000, 2001 e 2002. Todas as imagens foram corrigidas radiometricamente utilizando o algoritmo 6S (Sixs Motif) e o método de subtração de objetos escuros (DOS). Nas correções atmosféricas, foram avaliadas as incertezas nas comparações das assinaturas espectrais causadas pela falta de dados de observação da visibilidade, parâmetro de entrada no algoritmo 6S. Além das reflectâncias espectrais, os índices de vegetação NDVI e ARVI foram avaliados. Estas grandezas foram comparadas com a produção de serrapilheira. O NDVI apresentou valores maiores para o período de maior produção da serrapilheira. O aumento do NDVI foi determinado pela diminuição da reflectância espectral do vermelho. Medidas auxiliares da radiação fotossinteticamente ativa (PAR), obtidas a partir de sensores instalados em uma torre de coleta de dados micrometeorológicos, próximo à área de estudo, não confirmaram a diminuição da reflectância na faixa espectral do vermelho para o período de maior produção de serrapilheira.

**Palavras-chave:** Serrapilheira, NDVI, ARVI, 6S, IKONOS.

# Abstract

SILVEIRA, S. W. G. **A spectral reflection analysis of a transition forest from IKONOS multitemporal images.** Cuiabá, 2004. 78 p. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Ciências Exatas e da Terra, Universidade Federal de Mato Grosso.

This work presents an variation analysis of the spectral reflection from a transition forest with cerrado, located in the region to the north of Sinop – MT, using the images IKONOS from years 2000, 2001 and 2002. All the images have been radiometrically corrected by the 6S algorithm (Sixs Motif) and by the method of dark object subtraction (DOS). In the atmospheric corrections, the uncertainties in the comparisons of the spectral signatures caused for lack of visibility observation data, parameter of entrance in the 6S algorithm, have been evaluated. Besides spectral reflectances, the vegetation indices NDVI and ARVI have been evaluated. These parameters have been compared with the litterfall production. The higher NDVI values have occurred for the period of the higher litterfall production. The increase of the NDVI values was determined by the reduction of the red spectral reflectance. Auxiliary measures of the photosynthetically-active radiation (PAR), from sensors installed on a tower of micrometeorological data collection, next to the study area, have not confirmed the reduction of red spectral reflectance for the period of higher litterfall production .

**Keywords:** Litterfall, NDVI, ARVI, 6S, IKONOS.

# 1 Introdução

Com uma extensão de mais de 5 milhões de quilômetros quadrados de floresta, a Amazônia é um dos mais importantes ecossistemas do planeta. É a maior extensão de floresta tropical úmida do mundo.

A conversão desta floresta em pastos para gados é um dos exemplos mais comuns de mudança na ocupação da terra. A rápida degradação e abandono do pasto devido à baixa fertilidade do solo proporcionam uma alta taxa de desmatamento.

Uma outra atividade que causa o desmatamento são as atividades agrícolas e a exploração da madeira.

Entender o impacto causado pelas mudanças no uso e ocupação do solo tem sido tema principal do programa de pesquisa internacional liderado pelo Brasil, denominado Experimento de Grande Escala da Biosfera-Atmosfera na Amazônia (LBA – Large Scale Biosphere-Atmosphere Experiment in Amazonia).

Com a implantação de uma torre de coleta de dados micrometeorológicos ao norte do município de Sinop, estado de Mato Grosso, em uma região de floresta tropical de transição com o cerrado, o grupo de Física e Meio Ambiente da Universidade Federal de Mato Grosso, integrado ao LBA, tem realizado diversos estudos de caráter ambiental, como avaliação estatística de biodiversidade arbórea (SULI et al., 2003), seqüestro de CO<sub>2</sub>, balanço de energia, produção de serrapilheira (SANCHES et al., 2003; RAITER et al., 2002), entre outros mais.

Em se tratando de serrapilheira, estes estudos buscam correlacionar a sua produção com outras medidas, como por exemplo, precipitação pluviométrica, temperatura, radiação fotosinteticamente ativa (PAR – Photosynthetically-Active Radiation), etc.

A importância dos estudos relacionados com a serrapilheira se dá pelo fato dela ser considerada o principal agente responsável pela ciclagem de nutrientes. Além de adicionar nutrientes ao solo, a serrapilheira aumenta a estrutura deste e reduz a erosão. A serrapilheira também afeta a infiltração e a evaporação da água no solo (NAGLER et al., 2000).

Uma importante ferramenta associada aos estudos ambientais é o sensoriamento remoto com o uso de imagens de satélite. O LBA adquiriu diversas imagens do satélite IKONOS, onde este, com uma banda pan-cromática de 1 m de resolução espacial e 4 bandas multiespectrais de 4 m de resolução, tem fornecido informações importantes sobre a composição da vegetação e detalhes específicos nas mudanças de uso da terra (HURTT et al., 2003).

O objetivo deste trabalho foi analisar a relação entre as reflexões do dossel deste tipo de floresta com a produção de serrapilheira, através de imagens multiespectrais e multitemporais do satélite IKONOS. A variação sazonal da produção de serrapilheira foi correlacionada com os valores de reflectâncias nas faixas do vermelho e do infravermelho próximo, bem como, com os índices de vegetação NDVI e ARVI.

Também foi investigado a interferência que a presença da atmosfera causa nos valores calculados de reflectâncias e índices de vegetação, obtidos a partir das imagens multiespectrais do IKONOS. Um estudo sobre os métodos de correção atmosférica das imagens do IKONOS, afim de minimizar os efeitos atmosféricos, também foram realizados.

O dados de produção de serrapilheira, analisados neste trabalho, foram obtidos a partir do ano de 2001 e as imagens do IKONOS, adquiridas pelo LBA, são dos anos de 2000, 2001 e 2002.

No capítulo 2 é feita uma revisão bibliográfica sobre radiação eletromagnética e sua interação com os diversos tipos de superfícies (solo, vegetação e água) e com a atmosfera. São apresentados os principais sistemas sensores usados nos satélites de sensoriamento remoto, suas características e suas aplicações. Os índices de vegetação, que são usados para distinguir a vegetação de outras superfícies, bem como avaliá-la, são também descritos. Posteriormente, é feita uma revisão bibliográfica sobre a serrapilheira, sua importância ecológica e suas propriedades espectrais.

O capítulo 3 apresenta a área de estudo de onde a serrapilheira foi coletada, correspondendo, obviamente, às coordenadas geográficas das imagens de satélite. Apresenta, também, os métodos usados: para medir e calcular a produção de serrapilheira; na criação de cenários de condições atmosféricas para tratamento das imagens IKONOS; para fazer as correções atmosféricas das imagens IKONOS, baseados em parâmetros da própria imagem; para a estimativa da produção de serrapilheira com a análise das imagens, correlacionando estes dados com as informações obtidas das medidas de serrapilheira feita *in loco*.

No capítulo 4 é feita uma análise dos resultados obtidos, apresentando a produção de serrapilheira, os valores de reflectância e índices de vegetação, bem como, uma comparação entre

estas medidas. É apresentado também os erros cometidos nos valores de reflectâncias, causados pela ausência de parâmetros necessários para se fazer a correção atmosférica das imagens.

O capítulo 5 apresenta as discussões dos resultados obtidos, sugestões para outros trabalhos, possíveis aplicações e as conclusões.

## 2 Revisão Bibliográfica

### 2.1 Radiação eletromagnética

A energia recebida pelos sistemas de sensoriamento remoto é proveniente da radiação eletromagnética refletida ou emitida pelos objetos na superfície terrestre.

Para se estudar o sensoriamento remoto, faz-se necessário uma classificação da radiação eletromagnética de acordo com a localização de seus comprimentos de onda dentro do espectro eletromagnético, conforme a Figura 1. São utilizados pelo sensoriamento remoto as faixas espectrais do visível, do infravermelho (IR – infrared) e das microondas.

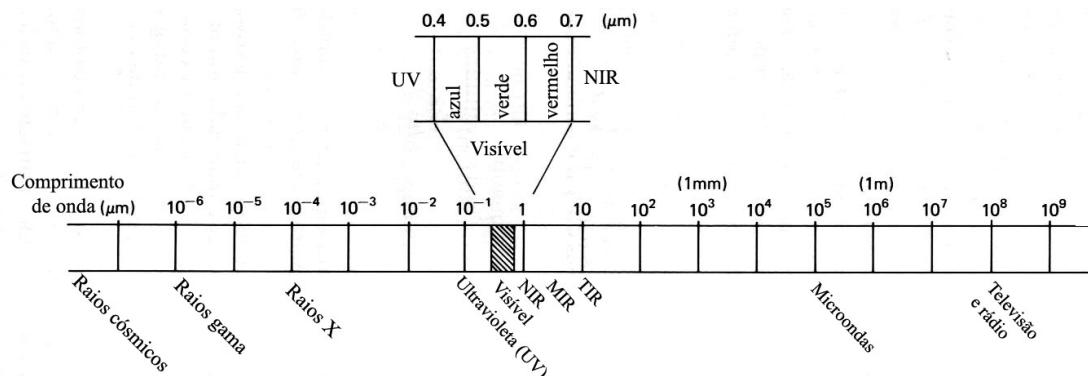


Figura 1: O espectro eletromagnético. Onde: NIR = infravermelho próximo, MIR = infravermelho médio, TIR = infravermelho térmico e UV = ultravioleta. Fonte: Lillesand & Kiefer (1994), p. 5.

A faixa do visível, de acordo com a Figura 1, vai de cerca de  $0,4 \mu\text{m}$  a aproximadamente  $0,7 \mu\text{m}$ . Pode ser subdividida, conforme a percepção humana, nas faixas do “azul” ( $0,4$  a  $0,5 \mu\text{m}$ ), “verde” ( $0,5$  a  $0,6 \mu\text{m}$ ) e “vermelho” ( $0,6$  a  $0,7 \mu\text{m}$ ).

O infravermelho (IR), que é uma faixa que vai além da luz vermelha, está dividido em três categorias: infravermelho próximo (NIR – near-IR, de  $0,7$  a  $1,3 \mu\text{m}$ ), infravermelho médio (MIR – mid-IR, de  $1,3$  a  $3 \mu\text{m}$ ) e infravermelho térmico (TIR – thermal-IR, acima de  $3 \mu\text{m}$ ).

As ondas de comprimentos maiores (de  $1 \text{ mm}$  a  $1 \text{ m}$ ) compreendem a porção de microondas do espectro (LILLESAND; KIEFER, 1994; MOREIRA, 2001).

A energia emitida por um corpo pode ser compreendida pela teoria do corpo negro, onde corpo negro é um radiador hipotético ideal que absorve totalmente e reemite toda a energia que incide sobre ele. A energia emitida varia em função da temperatura, conforme pode-se verificar pela análise da Figura 2.

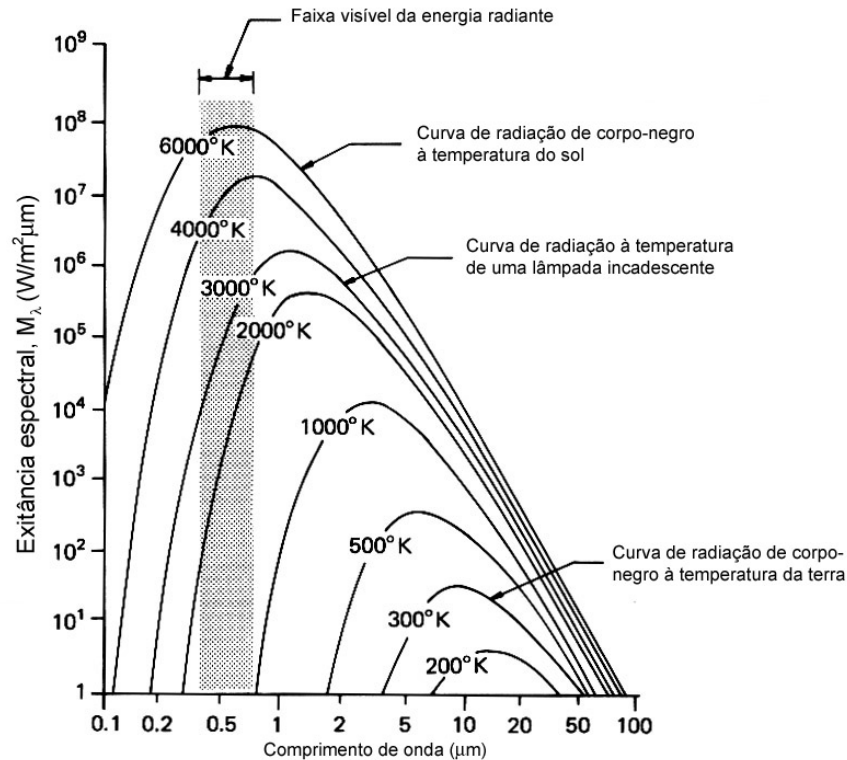


Figura 2: Distribuição espectral de energia de um corpo negro para várias temperaturas. Fonte: Lillesand & Kiefer (1994), p. 8.

A quantidade de energia que um corpo irradia é uma função da temperatura superficial deste corpo, expressado pela lei de Stefan-Boltzmann, que diz

$$M = \sigma T^4 \quad (2.1)$$

onde

$M$  = radiância total, ( $\text{W}/\text{m}^2$ )

$\sigma$  = constante de Stefan-Boltzmann,  $5,6607 \times 10^{-8} \text{ W}/\text{m}^2\text{K}^4$

$T$  = temperatura absoluta (K) do material emissor.

## 2.2 Interações da radiação eletromagnética com a superfície

A radiação eletromagnética, ao atingir uma superfície, interage com a mesma, sendo que uma parte é absorvida e outra é refletida. Para cada tipo de superfície haverá uma interação particular. A Figura 3 apresenta as curvas espectrais de reflectância (assinaturas espectrais) para três tipos de superfícies terrestres: vegetação verde saudável, solo seco descoberto (argila cinza-marrom) e água limpa (de um lago, por exemplo).

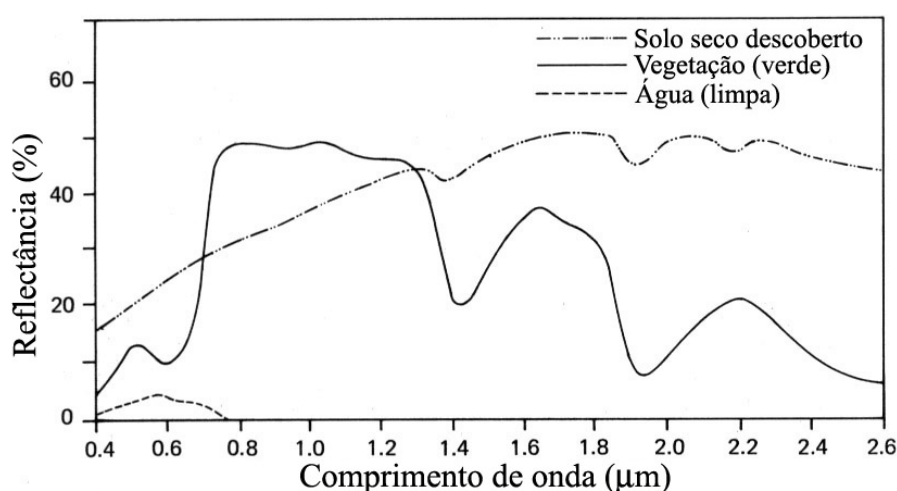


Figura 3: Curva espectral da vegetação, da água e do solo mostrando a porcentagem da energia refletida em função do comprimento de onda. Fonte: Lillesand & Kiefer (1994), p. 18.

Essas linhas representam curvas médias de reflectância obtidas a partir de um grande número de amostras. Em geral, o formato dessas curvas servem como um indicador do tipo e condição de superfície a que elas se aplicam. Como por exemplo, as curvas espectrais para uma vegetação verde saudável, quase sempre apresentam uma configuração do tipo “pico e vale” ilustrado na Figura 3. Os vales, na região do visível, são devidos aos pigmentos nas folhas das plantas. A clorofila, por exemplo, absorve a energia nas faixas de comprimento de onda centradas em 0,45 e 0,67  $\mu\text{m}$ . Já o pico, na região do visível, é a região onde a absorção é menor (luz verde). Para a faixa do infravermelho próximo (0,7 a 1,3  $\mu\text{m}$ ), a reflectância assume valores maiores do que para a faixa do visível.

Para o solo, alguns fatores que afetam a reflectância são seu teor de umidade, sua textura (proporção de areia, silte e argila), a rugosidade de sua superfície, a presença de óxido de ferro, e seu conteúdo de matéria orgânica.

Para a água, uma das características mais distintas é a absorção da energia na faixa do infravermelho próximo. Isto se dá tanto para corpos d’água (lagos e rios) como para água contida nas plantas (LILLESAND; KIEFER, 1994).



## 2.3 Interações da radiação eletromagnética com a atmosfera

Toda radiação eletromagnética detectada por sistemas sensores remotos, independente de sua fonte, passa através da atmosfera. O efeito líquido causado pela atmosfera sobre o sinal que através dela propaga depende da distância percorrida, da magnitude do sinal a ser medido, das condições atmosféricas presentes e do comprimento de onda envolvido (Figura 4).

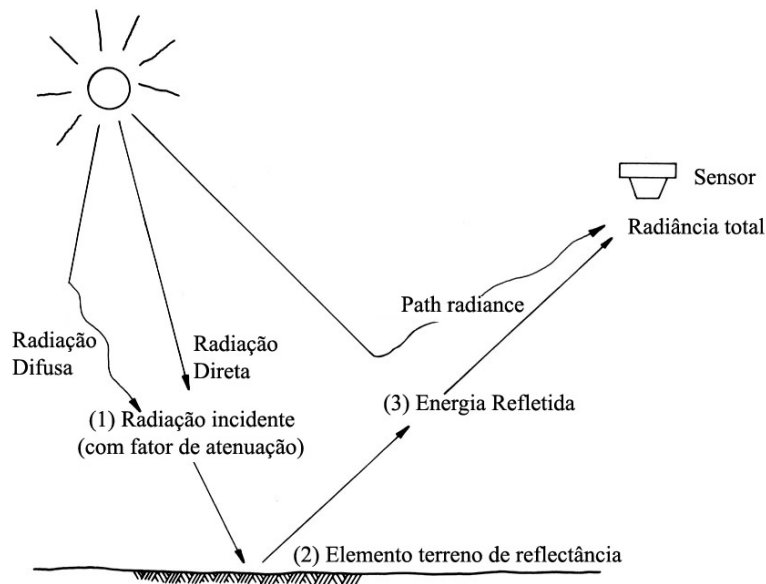


Figura 4: Efeitos da atmosfera que influenciam a medida da energia solar refletida. Fonte: Lillesand & Kiefer (1994), p. 22.

A atmosfera afeta, principalmente, a intensidade e a composição espectral da radiação disponível para o sistema sensor. Esses efeitos são causados pela *absorção* e pelo *espalhamento* (RICHARDS, 1986; LILLESAND; KIEFER, 1994).

A presença da atmosfera atenua a energia incidente sobre um objeto na superfície (sendo refletido pelo objeto) e, de modo contrário, adiciona energia ao sinal detectado pelo sensor através de uma radiação externa (*path radiance*). Esta radiação externa é devida à energia incidente que é espalhada pelos constituintes da atmosfera direto para o sensor antes de atingir o solo.

A energia irradiante que atinge um objeto sobre o solo pode vir de duas fontes: diretamente dos raios solares e da radiação difusa (espalhada pelo céu). A predominância de uma sobre a outra depende das condições climáticas (e.g. ensolarado, nublado, etc.). De mesmo modo, a irradiância varia com as mudanças sazonais (ângulo de elevação solar e a distância terra-sol).

A seguir são descritos os fenômenos da absorção e do espalhamento.

### 2.3.1 Absorção

As moléculas de oxigênio, de dióxido de carbono, de ozônio e de água, presentes na atmosfera, atenuam intensamente a radiação eletromagnética em certas bandas espectrais, convertendo a energia recebida em calor. Os sensores a bordo dos satélites, normalmente, são desenvolvidos para operarem fora destas faixas conhecidas, minimizando, portanto, o problema de absorção (RICHARDS, 1986).

A Figura 5 mostra a relação entre as fontes de energia e as características da absorção atmosférica.

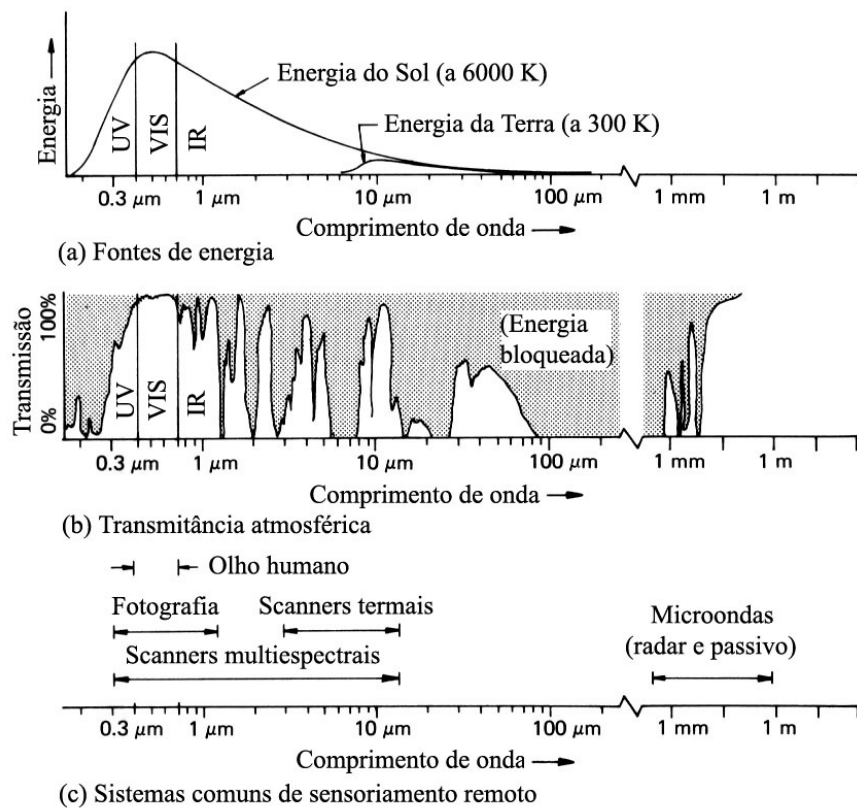


Figura 5: Características espectrais das (a) fontes de energia, (b) dos efeitos atmosféricos, e (c) dos sistemas sensores. Fonte: Lillesand & Kiefer (1994), p. 11.

De acordo com a Figura 5a, a maior parte da energia emitida pelo Sol, a uma temperatura de 6000 K, está concentrada na faixa espectral do ultravioleta (UV), visível (VIS) e infravermelho (IR), enquanto que para a Terra, a uma temperatura de 300 K, a energia está mais concentrada na faixa espectral do infravermelho térmico (TIR).

A Figura 5b mostra algumas janelas espectrais por onde a radiação atravessa a atmosfera com uma menor atenuação, enquanto em outras faixas é fortemente atenuada (a energia é bloqueada). Nota-se que na faixa espectral do infravermelho próximo (cerca de 0,7 a 1,3  $\mu\text{m}$ ),

existem alguns picos e vales, onde estes vales são regiões de forte atenuação causadas principalmente pela presença de vapor d'água na atmosfera. Os sensores multiespectrais (Figura 5c) operam na faixa espectral do visível e infravermelho, enquanto os “scanners termais” operam na faixa do infravermelho médio e térmico.

### **2.3.2 Espalhamento**

As partículas existentes na atmosfera obstruem a passagem da radiação, causando o que se conhece como espalhamento. Esse efeito influencia tanto a energia incidente quanto a refletida. É o mecanismo dominante de distorção radiométrica (desconsiderando os efeitos causados pelo sensor).

De acordo com o diâmetro das partículas presentes na atmosfera, o espalhamento pode ser do tipo Rayleigh, Mie ou Não-seletivo.

#### **2.3.2.1 Espalhamento Rayleigh**

O espalhamento Rayleigh, também conhecido como espalhamento molecular, ocorre quando a radiação interage com partículas cujos diâmetros são muito menores do que o comprimento de onda da radiação. É produzido essencialmente pelas moléculas de gases presentes na atmosfera.

#### **2.3.2.2 Espalhamento Mie**

Ocorre quando as partículas presentes na atmosfera possuem diâmetros da mesma ordem de grandeza do comprimento de onda da radiação. O vapor d'água e a poeira são os maiores causadores deste tipo de espalhamento.

#### **2.3.2.3 Espalhamento não-seletivo**

Ocorre quando o diâmetro das partículas é muito maior do que o comprimento de onda da radiação. Gotículas de água, por exemplo, causam este tipo de espalhamento. Atua quase que igualmente em todo o visível e do infravermelho próximo ao infravermelho médio.

## **2.4 Sistemas de sensoriamento remoto**

São definidos de sistemas sensores os dispositivos capazes de detectar e registrar a radiação eletromagnética, em determinada faixa espectral, e gerar informações que possam ser trans-

formadas em um produto, quer seja na forma de imagem, gráficos ou Tabelas, passíveis de interpretação (MOREIRA, 2001).

## 2.4.1 Classificação dos sistemas sensores

Segundo Moreira (2001), os sistemas sensores podem ser classificados quanto à fonte de radiação, quanto ao princípio de funcionamento e quanto ao tipo de produto.

### 2.4.1.1 Quanto à fonte de radiação

Quanto à fonte de radiação, podemos classificar os sistemas sensores de **passivos** e **ativos**.

Os sistemas **passivos** são aqueles que recebem a radiação refletida e/ou emitidas pelos alvos que por sua vez a recebem de uma fonte externa, como por exemplo, o Sol. Como exemplos dessa categoria de sensores, temos o Mapeador Temático (TM – *Thematic Mapper*) do Landsat 5, o Mapeador Temático Otimizado Plus (ETM+ – *Enhanced Thematic Mapper Plus*) do Landsat 7, o Imageador de Campo Largo (WFI – *Wide Field Imager*) e o *Charge-Coupled Device* (CCD) do CBERS, o sensor Pancromático (PAN) e os Multiespectrais (MS) do IKONOS, etc.

Os sistemas sensores que possuem uma fonte própria de radiação, não dependendo, portanto, de uma fonte externa, são classificados como **ativos**. Como exemplo, temos o Radar de Abertura Sintética (SAR – *Synthetic Aperture Radar*), o Radar de Abertura Real (RAR – *Real Aperture Radar*), etc.

### 2.4.1.2 Quanto ao princípio de funcionamento

Quanto ao princípio de funcionamento, os sistemas sensores podem ser classificados como de **varredura** (*scanning*) e de **não-varredura** (*non scanning*).

Os sistemas de não-varredura registram de uma só vez a radiação proveniente de uma área da superfície da Terra. Por esse motivo, são conhecidos como sistemas de quadro.

Já nos sistemas sensores de varredura, a imagem de uma cena é formada pela aquisição sequencial de pixels, onde pixel é um elemento de resolução espacial.

### 2.4.1.3 Quanto ao tipo de produto

Costuma-se dividir os sistemas sensores, quanto ao tipo de produto, em duas categorias: sistemas **fotográficos** e **não-fotográficos**.

Os sistemas fotográficos são todos os dispositivos imageadores que, através de um sistema óptico, registram a energia refletida pelos alvos em um filme fotográfico.

Os sistemas sensores não-fotográficos, também chamados de radiômetros, medem a intensidade da radiação eletromagnética, em determinadas faixas espectrais, dos alvos da superfície terrestre. Os radiômetros podem ser classificados como imageadores e não-imageadores.

Os radiômetros imageadores fornecem como produto imagens de uma cena no terreno, registrando a radiação eletromagnética em diferentes faixas espectrais, desde o ultravioleta até o infravermelho distante.

Já os radiômetros não-imageadores medem a radiância do alvo e apresentam os dados em forma de gráfico ou em forma numérica.

## **2.4.2 Características de um sensor**

A seguir são descritas algumas características dos sistemas sensores.

### **2.4.2.1 Resolução espacial**

É definido como a capacidade que um sensor tem de distinguir objetos da superfície terrestre. Pode ser definida como o menor elemento ou superfície distinguível, ou como a menor área de terreno que um sistema sensor é capaz de individualizar.

### **2.4.2.2 Resolução espectral**

É a capacidade que o sensor tem de discriminar pequenas diferenças espectrais, discriminando, desta forma, diferentes alvos sobre a superfície terrestre. Está relacionado com a largura espectral em que o sensor opera. Por exemplo, um sensor com largura de faixa de 100 nm tem menor resolução espectral que um de 50 nm de largura de faixa.

### **2.4.2.3 Resolução temporal**

Para sistemas sensores orbitais, refere-se ao intervalo de tempo em que o satélite leva para recobrir uma área de interesse, que depende da largura da faixa imageada sobre o solo.

#### 2.4.2.4 Resolução radiométrica

Refere-se a capacidade que um sistema sensor tem de discriminar alvos com pequenas diferenças de intensidade de radiação refletida e/ou emitida de uma superfície. Também, pode-se dizer que é a quantidade de níveis em uma escala de cinza que um sensor possui. Como exemplo, um sensor que opera com uma resolução radiométrica de 8 bits possui  $2^8 = 256$  níveis de cinza, já um sensor que trabalha com 11 bits possui  $2^{11} = 2048$  níveis de cinza. Este último possui maior resolução espectral que o primeiro.

#### 2.4.3 Os sensores usados na série Landsat

O primeiro satélite da série Landsat (na época denominado de ERTS-1) foi lançado em 23 de julho de 1973 e esteve operacional até 6 de janeiro de 1978. Os três primeiros satélites desta série (Landsat-1, -2 e -3) levaram à bordo os seguintes sistemas sensores: Return Beam Vidicon (RBV) e Multispectral Scanner (MSS). O sistema RBV do Landsat-3 foi aperfeiçoado em relação aos sistemas RBV's dos dois primeiros satélites. Estes três satélites foram lançados em uma órbita de 900 km de altitude nominal que passavam dentro de 9° dos pólos Norte e Sul.

Os satélites Landsat-4 e -5 levaram à bordo o sistema sensor denominado Thematic mapper (TM) no lugar do RBV. Estes satélites, semelhantemente aos seus antecessores, foram lançados em uma órbita circular, sol-síncrona, próximo aos pólos, entretanto, tiveram suas órbitas abaixada de 900 km para 705 km para auxiliar no melhoramento da resolução espacial de seus sensores à bordo.

O satélite Landsat-6 sofrera uma falha em seu lançamento. Ele levaria à bordo o sensor Enhanced Thematic Mapper (ETM) (LILLESAND; KIEFER, 1994).

A Tabela 1 apresenta as faixas espectrais e as resoluções de cada sistema sensor usados nas seis primeiras missões da série Landsat.

Até a data desta escrita (2004), sete satélites da série Landsat foram desenvolvidos, e apenas o Landsat-5 está operacional. O último satélite desta série (Landsat-7) esteve operacional até o ano de 2003. Ele levava a bordo o sensor Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+).

As características do sensor ETM+ usado no satélite Landsat-7 são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 1: Sensores usados nas missões de 1 a 6 da série Landsat

| Sensor           | Missão | Faixa Espectral ( $\mu\text{m}$ )   | Resolução (m)      |
|------------------|--------|-------------------------------------|--------------------|
| RBV              | 1, 2   | 0,475 - 0,575                       | 80                 |
|                  |        | 0,580 - 0,680                       | 80                 |
|                  |        | 0,690 - 0,830                       | 80                 |
| MSS              | 3      | 0,505 - 0,750                       | 30                 |
|                  | 1 -5   | 0,5 - 0,6                           | 79/82 <sup>a</sup> |
|                  |        | 0,6 - 0,7                           | 79/82              |
|                  |        | 0,7 - 0,8                           | 79/82              |
|                  |        | 0,8 - 1,1                           | 79/82              |
| TM               | 3      | 10,4 - 12,6 <sup>b</sup>            | 240                |
|                  | 4, 5   | 0,45 - 0,52                         | 30                 |
|                  |        | 0,52 - 0,60                         | 30                 |
|                  |        | 0,63 - 0,69                         | 30                 |
|                  |        | 0,76 - 0,90                         | 30                 |
|                  |        | 1,55 - 1,75                         | 30                 |
|                  |        | 10,4 - 12,5                         | 120                |
|                  |        | 2,08 - 2,35                         | 30                 |
| ETM <sup>c</sup> | 6      | Bandas TM acima<br>mais 0,50 - 0,90 | 15                 |

<sup>a</sup>79 m Landsat-1 ao -3, e 82 m para o Landsat-4 e -5.

<sup>b</sup>Falhou logo após o lançamento (banda 8 do Landsat-3).

<sup>c</sup>Landsat-6 Falhou no lançamento.

Fonte: Lillesand & Kiefer (1994), p. 432.

Tabela 2: Bandas espectrais do sensor ETM+

| Canais | Faixa/Região Espectral               | Resolução (m) |
|--------|--------------------------------------|---------------|
| 1      | 0,45 – 0,52 $\mu\text{m}$ (azul)     | 30            |
| 2      | 0,52 – 0,60 $\mu\text{m}$ (verde)    | 30            |
| 3      | 0,63 – 0,76 $\mu\text{m}$ (vermelho) | 30            |
| 4      | 0,76 – 0,90 $\mu\text{m}$ (NIR)      | 30            |
| 5      | 1,55 – 1,75 $\mu\text{m}$ (MIR)      | 30            |
| 6      | 10,42 – 12,50 $\mu\text{m}$ (TIR)    | 60            |
| 7      | 2,08 – 2,35 $\mu\text{m}$ (MIR)      | 30            |
| 8      | 0,50 – 0,90 $\mu\text{m}$ (VIS/NIR)  | 15            |

VIS = visível; NIR = infravermelho próximo;

MIR = infravermelho médio; TIR = infravermelho termal.

Adaptado de: Florenzano (2002), p. 27.

## 2.4.4 Os sensores usados no CBERS

O Satélite Sino-Brasileiro de Recursos Terrestres (CBERS – *China Brazil Earth Resource Satellite*) foi lançado em 14 de outubro de 1999 pelo foguete Longa Marcha, da base de Taiyuan, na China. Ele leva a bordo os seguintes sensores: o CCD, o WFI e o InfraRed Multispectral Scanner Subsystem (IR-MSS). As características de cada sensor são apresentadas nas Tabelas 3, 4, 5. Em 21 de outubro de 2003 foi lançado o satélite CBERS-2 levando a bordo os mesmos sensores do CBERS-1, seu antecessor. O CBERS é sol-síncrono, com órbita polar de 98,5° de inclinação em relação ao plano equatorial (MOREIRA, 2001).

Tabela 3: Bandas espectrais do sensor CCD do CBERS

| Bandas   | Faixas espectrais<br>$\mu\text{m}$ | Região do espectro | Resolução espacial<br>(m $\times$ m) |
|----------|------------------------------------|--------------------|--------------------------------------|
| B1       | 0,45 - 0,52                        | Azul               | 19,5                                 |
| B2       | 0,52 - 0,59                        | Verde              | 19,5                                 |
| B3       | 0,63 - 0,69                        | Vermelho           | 19,5                                 |
| B4       | 0,77 - 0,89                        | NIR                | 19,5                                 |
| B5 (PAN) | 0,51 - 0,73                        | VIS-NIR            | 19,5                                 |

NIR = infravermelho próximo; VIS = visível; PAN = pancromático.

Adaptado de: Moreira (2001), p. 149.

Tabela 4: Bandas espectrais do sensor IR-MSS do CBERS

| Bandas | Faixas espectrais<br>$\mu\text{m}$ | Região do espectro | Resolução espacial<br>(m $\times$ m) |
|--------|------------------------------------|--------------------|--------------------------------------|
| B6     | 0,50 - 1,1                         | VIS-NIR            | 77,8                                 |
| B7     | 1,55 - 1,75                        | MIR                | 77,8                                 |
| B8     | 2,08 - 2,35                        | MIR                | 77,8                                 |
| B9     | 10,04 - 12,05                      | TIR                | 77,8                                 |

NIR = infravermelho próximo; VIS = visível; MIR = infravermelho médio; TIR = infravermelho térmico.

Adaptado de: Moreira (2001), p. 150.

Tabela 5: Bandas espectrais do sensor WFI do CBERS

| Bandas | Faixas espectrais<br>$\mu\text{m}$ | Região do espectro | Resolução espacial<br>(m $\times$ m) |
|--------|------------------------------------|--------------------|--------------------------------------|
| B10    | 0,63 - 0,69                        | Vermelho           | 256                                  |
| B11    | 0,77 - 0,89                        | NIR                | 256                                  |

NIR = infravermelho próximo

Adaptado de: Moreira (2001), p. 150.



## 2.4.5 Os sensores usados no IKONOS

O IKONOS-2, lançado em 24 de setembro de 1999, foi o primeiro satélite comercial do mundo a ter um imageador de 1 m de resolução. A altitude de sua órbita é de, aproximadamente, 681 km, com um ângulo de  $98,1^\circ$  em relação ao plano equatorial, proporcionando uma operação sol-síncrona. Possui uma banda pancromática de 1 m de resolução e quatro bandas multiespectrais (azul, verde, vermelho e infravermelho próximo) com resolução de 4 m (FLORENZANO, 2002; HURTT et al., 2003; DIAL et al., 2003). O espectro de frequência das faixas multiespectrais do IKONOS são similares às quatro primeiras faixas do sensor TM/ETM+ do Landsat. A faixa do infravermelho próximo foi ligeiramente modificada, em relação a do Landsat, para minimizar o efeito da absorção da radiação causada pela presença de água na atmosfera (PAGNUTTI et al., 2003). A Tabela 6 resume os parâmetros que descrevem suas faixas multiespectrais. As Figuras 6 e 7 apresentam as respostas espectrais relativas dessas bandas.

Tabela 6: Bandas espectrais do satélite IKONOS

| Banda | Faixa espectral (nm) | Região do espectro | Resolução espacial (m×m) |
|-------|----------------------|--------------------|--------------------------|
| Pan   | 525,8 - 928,5        | VIS-NIR            | 1                        |
| MS-1  | 444,7 - 516,0        | Azul               | 4                        |
| MS-2  | 506,4 - 595,0        | Verde              | 4                        |
| MS-3  | 631,9 - 697,7        | Vermelho           | 4                        |
| MS-4  | 757,3 - 852,7        | NIR                | 4                        |

VIS = visível e NIR = infravermelho próximo

Adaptado do documento número SE-REF-016 - Rev. A - SPACE IMAGING<sup>TM</sup>

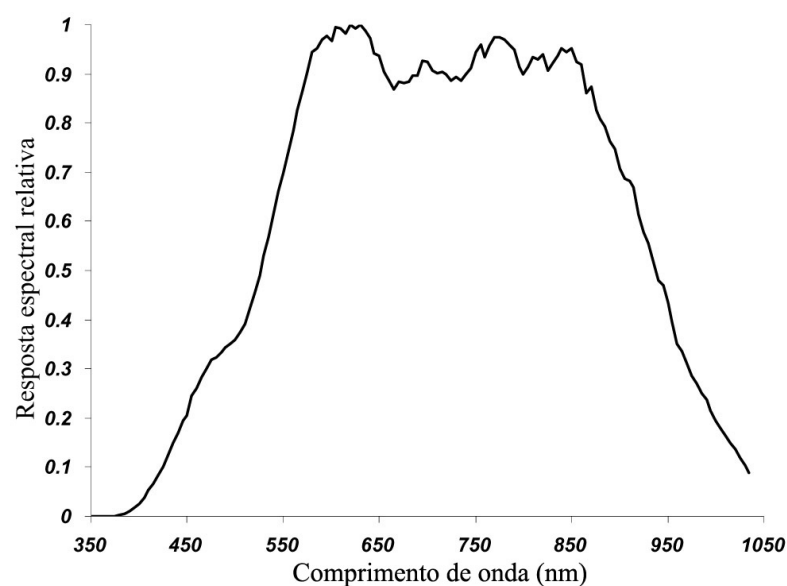


Figura 6: Resposta espectral relativa da banda pancromática do IKONOS. Adaptado do documento número SE-REF-016 - Rev. A - SPACE IMAGING<sup>TM</sup>

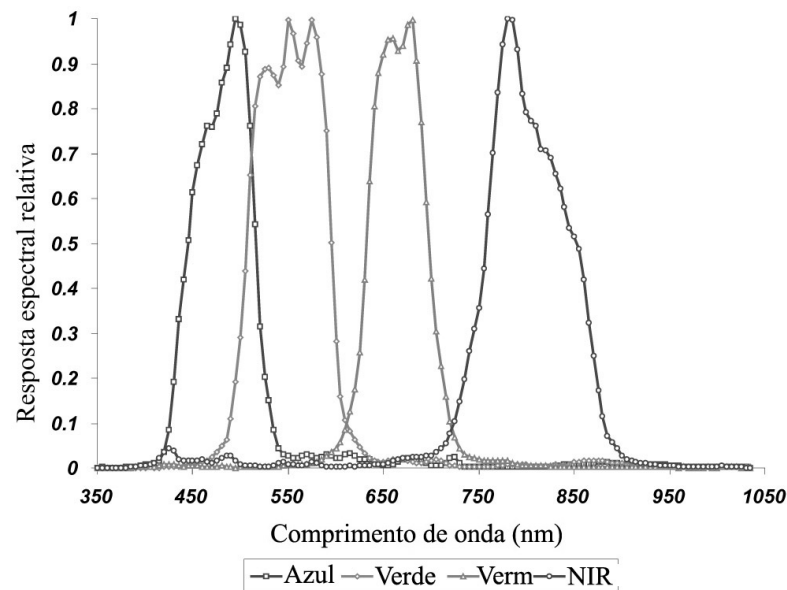


Figura 7: Resposta espectral relativa das bandas multiespectrais do IKONOS. Adaptado do documento número SE-REF-016 - Rev. A - SPACE IMAGING<sup>TM</sup>

## 2.5 Correção atmosférica

Como visto na seção 2.3, a atmosfera interfere no valor do sinal recebido pelo sensor, portanto, se faz necessário adotar um procedimento para retirar ou minimizar esta interferência. A este procedimento é dado o nome de correção atmosférica.

Existem algumas técnicas para se fazer a correção atmosférica de uma imagem de sensoria-mento remoto, dentre elas, tem-se o método radiativo, a técnica da subtração de objetos escuros e a técnica da sombra.

### 2.5.1 Modelo de transferência radiativo

São algoritmos de correção atmosférica que levam em conta parâmetros da atmosfera, como visibilidade, teor de vapor d'água, ozônio, tipos e concentração de aerossóis, características da superfície, condições geométricas (ângulo solar e de visada), condições espectrais, entre outros. Como exemplo podemos citar o *Simulation of Satellite Signal in the Solar Spectrum* – 5S (TANRÉ et al., 1990), o *Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum* – 6S (VERMOTE et al., 1997), e o *Simplified Method for Atmospheric Correction* – SMAC (RAHMAN; DEDIEU, 1994).

### 2.5.2 Técnica da sombra

Esta técnica mede o valor de um pixel dentro de uma sombra e o valor de um pixel fora da sombra (próximo a ela).

O valor de um pixel medido na suposta sombra poderia conter informações de sua penumbra, portanto, resolveu-se não utilizar esse método. A Figura 8 ilustra a técnica da sombra para fazer a correção atmosférica.

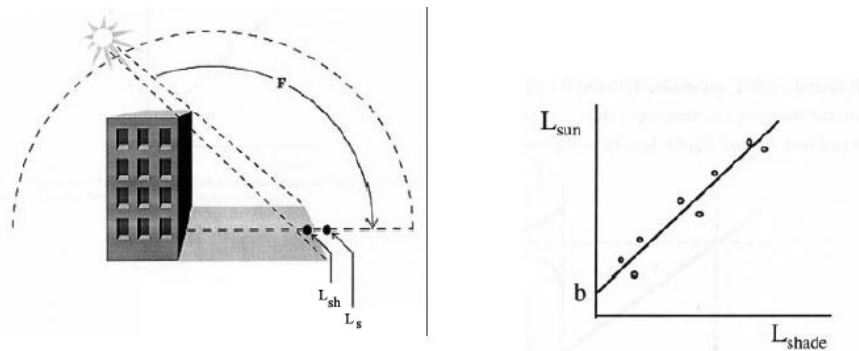


Figura 8: Técnica da sombra para correção atmosférica, onde  $L_s$  é a radiação recebida pelo sensor de um pixel diretamente iluminado pela radiação solar;  $L_{sh}$  é a radiação proveniente de um pixel na sombra (próximo ao pixel iluminado)

### 2.5.3 Técnica da subtração de objetos escuros

Essa técnica consiste em assumir que para cada banda para uma dada cena, devem existir alguns pixels com valores de brilho próximo de zero, mas que os efeitos causados pela presença da atmosfera adicionaram valores constantes para cada pixel em cada banda. Por exemplo, a reflectância da água limpa e profunda (e.g. lagos e rios) é essencialmente zero na região do infravermelho próximo do espectro eletromagnético (RICHARDS, 1986; CHAVEZ, 1988; LILLESAND; KIEFER, 1994).

## 2.6 Índices de vegetação

Os índices de vegetação são combinações matemáticas entre os canais de um sensor que funcionam como um indicador sensível a presença e condição da vegetação. São amplamente usados para monitorar, analisar, e mapear as variações temporais e espaciais na estrutura da vegetação (LILLESAND; KIEFER, 1994; GITELSON et al., 2002; STEVEN et al., 2003).

A seguir são apresentados alguns índices.

### 2.6.1 VI

O índice de vegetação simples (VI – *Vegetation Index*), apresentado pela equação 2.2, é obtido pela diferença entre os canais vermelho e infravermelho próximo (LILLESAND; KIEFER, 1994).

$$VI = NIR - VER \quad (2.2)$$

onde VI é o índice de vegetação, NIR é a faixa espectral correspondente ao infravermelho próximo e VER é faixa espectral do vermelho.

### 2.6.2 NDVI

O índice de vegetação diferença normalizada (NDVI – *Normalized Difference Vegetation Index*), amplamente usado para estimar mudanças no estado de vegetação, originalmente, foi definido por:

$$NDVI = \frac{L_{NIR} - L_{VER}}{L_{NIR} + L_{VER}} \quad (2.3)$$

onde  $L_{NIR}$  e  $L_{RED}$  são as radiâncias dos canais NIR e vermelho, respectivamente.

O NDVI, também pode ser obtido a partir dos valores de reflectâncias

$$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_R}{\rho_{NIR} + \rho_R} \quad (2.4)$$

onde  $\rho_{NIR}$  e  $\rho_R$  são as reflectâncias nas faixas espectrais do infravermelho próximo (NIR) e vermelho, respectivamente (LILLESAND; KIEFER, 1994; GITELSON et al., 1996; STEVEN et al., 2003; GOWARD et al., 2003).

### 2.6.3 ARVI

O índice de vegetação atmosféricamente resistente (ARVI – *Atmospherically Resistant Vegetation Index*), dado pela equação 2.5, proposto por Kaufman & Tanré (1992), tem a vantagem de ser mais resistente aos efeitos da atmosfera sobre a radiação eletromagnética.

$$ARVI = \frac{\rho_{NIR} - (2\rho_R - \rho_B)}{\rho_{NIR} + (2\rho_R - \rho_B)} \quad (2.5)$$

onde  $\rho_{NIR}$  é a reflectância na faixa do infravermelho próximo,  $\rho_R$  é a reflectância na faixa do vermelho e  $\rho_B$  é a reflectância na faixa do azul.

## 2.7 Serrapilheira

### 2.7.1 Definição

Os componentes senescentes da parte aérea das plantas (folhas, frutos, flores, etc.), ao caírem sobre o solo, formam uma camada de fragmentos orgânicos. Esta camada recebe o nome de **serrapilheira** (ou **liteira**). A partir daí, começa um processo de decomposição da mesma com a liberação de elementos minerais que compõe os tecidos orgânicos (GOLLEY, 1978) *apud* (TOLEDO, 2003)<sup>1</sup> e (NAGLER et al., 2000).

### 2.7.2 A importância ecológica da serrapilheira

A decomposição da serrapilheira adiciona nutrientes ao solo, melhorando sua estrutura e reduzindo erosões. A serrapilheira também afeta a infiltração e a evaporação da água no solo, bem como a porosidade e a temperatura deste. Assim, a sua presença na superfície do solo influencia o fluxo de nutrientes, carbono, água e energia em ecossistemas terrestres. A sua quantificação é importante não somente para melhorar o balanço de energia da superfície, mas também para melhorar a estimativa de produtividade primária líquida e a taxa de reposição de nutrientes (AASE; TANAKA, 1991; REYCOSKY, 1994; NAGLER et al., 2000).

Em ecossistemas florestais tropicais, a produção de serrapilheira ocorre, normalmente, de forma contínua, sendo que a quantidade produzida nas diferentes épocas depende do tipo de vegetação (LEITÃO FILHO et al., 1993) *apud* (WERNECK et al., 2001)<sup>2</sup>.

<sup>1</sup>GOLLEY, F. B. **Ciclagem de minerais em um ecossistema de floresta tropical úmida**. São Paulo: EPU. Ed. da Universidade de São Paulo, 1978 *apud* TOLEDO, L. O. **Aporte de Serrapilheira, Fauna Edáfica e Taxa de Decomposição em Áreas de Floresta Secundária no Município de Pinhal, RJ**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, fevereiro 2003.

<sup>2</sup>LEITÃO FILHO, H. F.; PAGANO, S. N.; CESAR, O.; TIMONI, J. L.; RUEDA, J. J. **Ecologia da Mata Atlântica em Cubatão (SP)**. São Paulo: EDUNESP/EDUNICAMP, 1993. *apud* WERNECK, M. S.; PEDRALLI, G.; GIESEKE, L. F. **Produção de serrapilheira em três trechos de uma floresta semidecídua com diferentes graus de perturbação na Estação Ecológica do Tripuí, Ouro Preto, MG**. Revista Brasileira de Botânica, v. 24, n. 2, p. 195-198, junho 2001.

### 2.7.3 Propriedades espectrais da serrapilheira

As curvas espectrais de reflectância da serrapilheira e do solo são muito similares. Na região do visível e do infravermelho-próximo (VIS-NIR, 0,4 – 1,1  $\mu\text{m}$ ) essas curvas tem pouca distinção, dificultando assim a quantificação da cobertura de serrapilheira por técnicas de sensoriamento remoto (NAGLER et al., 2000).

Uma nova técnica para determinação da serrapilheira a partir das características espectrais, de tal maneira que possa ser distinguível das outras coberturas, é apresentada por Nagler et al. (2000), Nagler et al. (2001), Nagler et al. (2003) e Daughtry et al. (2004). Esta técnica usa o índice de absorção da celulose (CAI - Cellulose Absorption Index), que é obtido a partir da análise da assinatura espectral da serrapilheira e do solo na faixa espectral classificada como infravermelho de ondas curtas (SWIR - Shortwave Infrared), que vai de 1,1 – 2,5  $\mu\text{m}$ . De acordo com a Figura 9, pode-se verificar que as características dominantes são duas bandas de absorção de água centralizadas em 1,4  $\mu\text{m}$  e 1,9  $\mu\text{m}$ . Para a serrapilheira seca, observa-se, ainda, uma banda de absorção centralizada em 2,1  $\mu\text{m}$  associado com a celulose a lignina. A reflectância espectral média nas bandas centralizadas em 2,0  $\mu\text{m}$ , 2,1  $\mu\text{m}$  e 2,2  $\mu\text{m}$  pode ser usada para medir a concavidade ou convexidade das características de absorção da celulose-lignina. A equação 2.6 apresenta a fórmula matemática para o cálculo do CAI.

$$CAI = 0,5 \cdot (R_{2,0} + R_{2,2}) - R_{2,1} \quad (2.6)$$

onde  $R_{2,0}$ ,  $R_{2,1}$  e  $R_{2,2}$  são as bandas centradas em 2,02  $\mu\text{m}$ , 2,10  $\mu\text{m}$  e 2,22  $\mu\text{m}$ , respectivamente.

Conforme conclusão e sugestão de Nagler et al. (2000), não existem, na atualidade, sistemas sensores remotos a bordo de satélites com essas características espectrais, impedindo, portanto, a determinação da produção de serrapilheira pelo cálculo do CAI a partir de imagens de satélite.

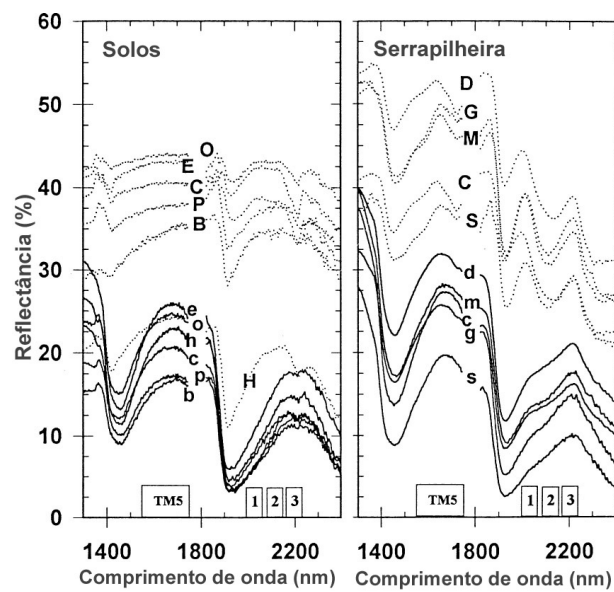


Figura 9: Reflectância espectral SWIR (1,3 – 2,4  $\mu\text{m}$ ) das serrapilheiras e dos solos secos (linha pontilhada) e úmidos (linha contínua). Os solos apresentados nesta Figura são Norte Americanos e estão descritos segundo sistema de classificação dos Estados Unidos, onde: Othello (O, o) - Argissolo, Cecil (E, e) - Argissolo, Codorus (C, c), Portneuf (P, p), Barnes (B, b) - Chernossolo, e Houston (H, h) - Vertissolo. As serrapilheiras são: milho (M, m), soja (S, s), arbustos decíduos (D, d), árvores coníferas (C, c), e grama (G, g). Fonte: Nagler et al. (2000), p. 212.

## 3 Materiais e métodos

### 3.1 Área de estudo

A área de estudo da produção de serrapilheira (Figura 10) situa-se próximo à cidade de Sinop, na região Norte do estado de Mato Grosso, em um sítio experimental da UFMT nas coordenadas  $11^{\circ}24,75' S$  e  $55^{\circ}19,50' W$ . É uma região de transição entre a floresta tropical úmida e o cerrado. A precipitação média anual é de 2000 milímetros, com uma estação seca de junho a setembro, e uma estação chuvosa de dezembro a fevereiro (RAITER et al., 2002).

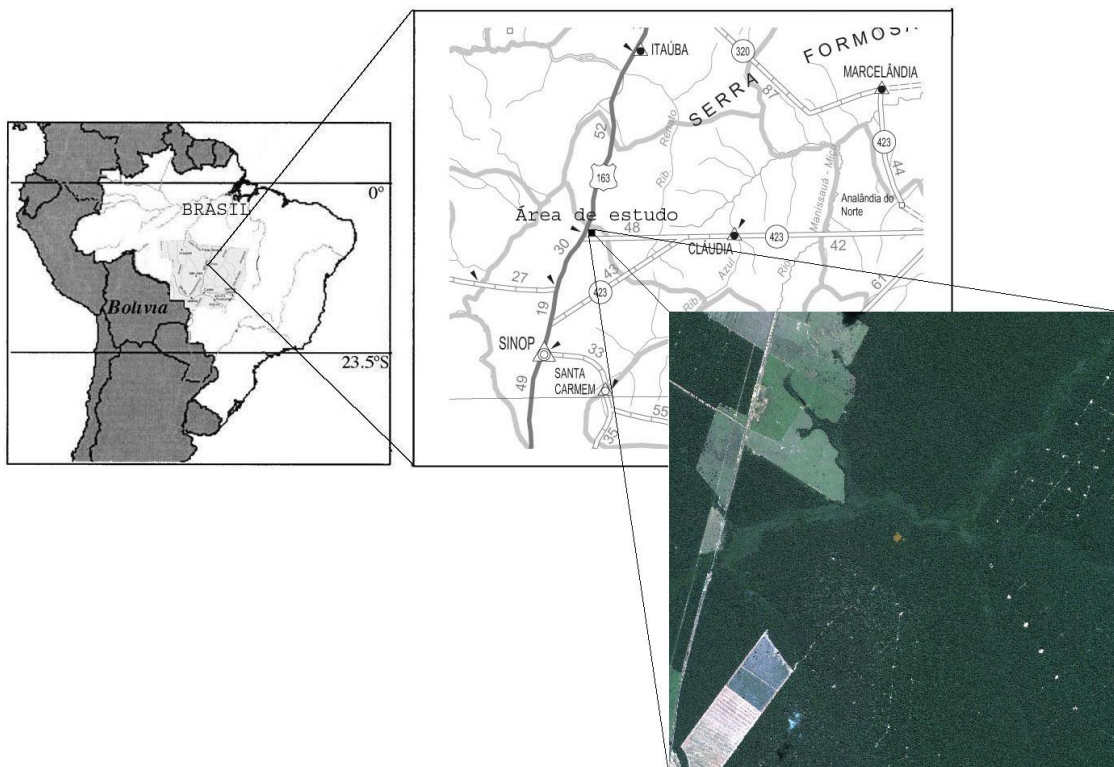


Figura 10: Localização da área de estudo. Parte inferior da Figura: Imagem IKONOS-2 de 19 de maio de 2001. Bandas: R (MS-3), G (MS-2) e B (MS-1).



## **3.2 Métodos**

### **3.2.1 Produção de serrapilheira**

Os dados de serrapilheira, usados neste trabalho, foram obtidos a partir da coleta realizada pela equipe da Universidade Federal de Mato Grosso campus de Sinop - MT. O processo de coleta de serrapilheira e o seu tratamento em laboratório são descritos a seguir.

Para se fazer a coleta de serrapilheira, foram instalados 20 coletores de 1 m<sup>2</sup> cada em uma parcela de 1 ha. No ano de 2001, as deposições da serrapilheira foram recolhidas mensalmente das caixas coletoras. A partir de 2002, a coletada da liteira passou a ser efetuada semanalmente.

Os materiais dos 20 coletores, colocados em sacos individuais, foram levados para o laboratório para serem separados em frações de folhas, galhos, flores e frutos. Os materiais foram secados em estufa a uma temperatura de 70°C por 72 h. Após a secagem, foram realizadas as medidas de suas massas (RAITER et al., 2002; SANCHES et al., 2003)

### **3.2.2 Medida da localização das caixas coletoras de serrapilheira**

As coordenadas geográficas das caixas coletoras de serrapilheira foram tomadas com o uso de um GPS Garmim 12XL. Usou-se uma antena externa para melhorar a qualidade do sinal, visto que sem a mesma, devido ao dossel ser fechado, o receptor perdia o sinal. O aparelho era colocado sobre cada caixa e ficava medindo o sinal durante cerca de 5 minutos. Foi usado o sistema de projeção UTM com Datum WGS84. A disposição das caixas coletoras e da torre de coleta de dados micrometeorológicos é apresentada na Figura 11.

### **3.2.3 Geoprocessamento**

Os processamentos das imagens foram realizadas com o auxílio do software Spring (CÂMARA et al., 1996). As imagens do IKONOS, adquiridas no formato GeoTIFF, foram transformadas para o formato Gridded binary (GRIB) pelo software Impima, sem se fazer a conversão para 8 bits, continuando, portanto, com uma resolução radiométrica de 11 bits.

A Tabela 7 resume as imagens do IKONOS usadas neste trabalho.

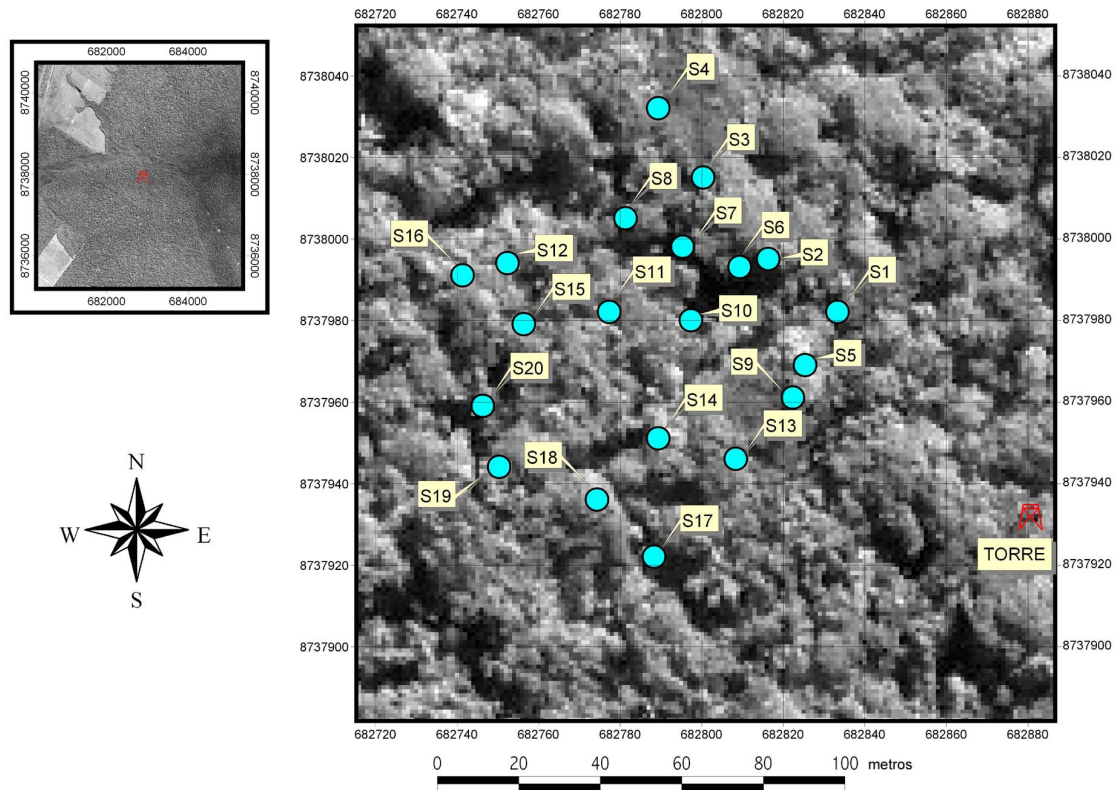


Figura 11: Disposição das caixas coletoras de serrapilheira e da torre de coleta de dados micrometeorológicos, onde S1 representa a caixa número 1, S2 a caixa número 2, e, assim, sucessivamente. Imagem IKONOS pancromática com 1 metro de resolução de 05 de julho de 2002.

Tabela 7: Lista das imagens IKONOS usadas neste trabalho

| Aquisição |            | Ângulo solar |        | Ângulo de visada |        |
|-----------|------------|--------------|--------|------------------|--------|
| Data      | Hora (GMT) | Azimuth      | Zenith | Azimuth          | Zenith |
| 30-abr-00 | 13:46      | 47,12        | 38,23  | 262,23           | 10,43  |
| 19-mai-01 | 13:52      | 39,96        | 40,60  | 79,08            | 19,96  |
| 5-jul-02  | 14:11      | 34,12        | 41,22  | 203,74           | 7,27   |

### 3.2.4 Georreferenciamento das imagens

Embora as imagens do IKONOS tenham sido adquiridas no formato GeoTIFF, portanto com correção geométrica do sistema (sistema que se baseia no uso de parâmetros físicos inerentes à situação de aquisição de cada imagem), o registro das imagens se faz necessário para minimizar o erro residual oriundo da incerteza na posição do satélite. Este erro era visível quando se fazia uma comparação multitemporal das imagens. Na ausência de pontos de controle obtidos em campo, a imagem de 2000 foi tomada como referência para se corrigir as de 2001 e 2002. Para esse procedimento, a imagem pan-cromática de 1 m de resolução espacial foi utilizada.

### 3.2.5 Correção radiométrica

As imagens obtidas por sensoriamento remoto são fornecidas em valores digitais, ou números digitais (DN – *Digital Numbers*). Os DN's não são adequados para análises comparativas quando estes são obtidos por dois sensores diferentes ou quando, embora sejam do mesmo sensor, são de épocas diferentes. Há, portanto, a necessidade de conversão para grandezas físicas calibradas (GOWARD et al., 2003).

#### 3.2.5.1 Radiância espectral

A radiância espectral, que representa a energia radiante para cada faixa espectral que chega ao sensor, foi obtida a partir dos DN's e dos coeficientes de calibração do IKONOS para cada faixa espectral (Tabela 8), de acordo com a equação 3.1.

$$L_{\lambda} = \frac{10 \cdot DN}{CalCoe_{\lambda} \cdot Bandwidth} \quad (3.1)$$

onde  $L_{\lambda}$  é a radiância espectral ( $W/m^2 sr \mu m$ ),  $DN$  é o valor digital do pixel,  $CalCoe_{\lambda}$  é o coeficiente de calibração para cada faixa, e  $Bandwidth$  é a largura de faixa.

Tabela 8: Coeficientes de calibração radiométrica IKONOS para produto de 11 bits (DN/mW/cm<sup>2</sup> sr)

| Data da imagem    | Blue | Green | Red | NIR |
|-------------------|------|-------|-----|-----|
| antes de 22/02/01 | 633  | 649   | 840 | 746 |
| após 22/02/01     | 728  | 727   | 949 | 843 |

Fonte: Space Imaging (2001)

### 3.2.5.2 Reflectância planetária

A reflectância planetária, ou aparente, é uma grandeza mais fácil de se comparar entre sensores e também entre medidas do solo, do que a radiância espectral, porque é levado em consideração a irradiância solar incidente sobre a superfície no momento da obtenção da imagem. A reflectância planetária é a razão entre radiância espectral medida pelo sensor e a radiância espectral incidente na altitude do sensor (Eq. 3.2)

$$\rho_{p\lambda} = \frac{\pi L_{\lambda} d^2}{ESUN_{\lambda} \cos(\theta_s)} \quad (3.2)$$

onde  $\rho_{p\lambda}$  é a reflectância planetária,  $L_{\lambda}$  é a radiância espectral ( $\text{W}/\text{m}^2 \text{sr } \mu\text{m}$ ),  $ESUN_{\lambda}$  é a irradiância solar média exo-atmosfera dependente da faixa espectral do sensor ( $\text{W}/\text{m}^2 \mu\text{m}$ ),  $\theta_s$  é o ângulo solar zenital e  $d$  é a distância terra-sol (unidade astronômica) (GOWARD et al., 2003).

As irradiâncias exo-atmosfera para o IKONOS e para o Landsat 7, apresentadas na Tabela 9, foram obtidas como descrito em Goward et al. (2003).

Tabela 9: Valores de  $ESUN_{\lambda}$  para o Landsat 7 e o IKONOS ( $\text{W}/\text{m}^2 \mu\text{m}$ )

| Banda    | Landsat 7 | IKONOS |
|----------|-----------|--------|
| Azul     | 1970      | 1939   |
| Verde    | 1843      | 1847   |
| Vermelho | 1555      | 1536   |
| NIR      | 1047      | 1148   |

Adaptado de: Goward et al. (2003), p. 87.

A reflectância planetária é uma medida do topo da atmosfera e, portanto, varia com as condições atmosféricas mesmo quando nenhuma mudança na superfície medida é observada.

O apêndice A apresenta os códigos fontes usados no programa LEGAL do Spring para fazer a conversão dos DN's para radiância espectral, reflectância aparente e reflectância com correção atmosférica e a geração de NDVI a partir dos valores de reflectância.

### 3.2.6 Correção atmosférica

As correções atmosféricas das imagens multiespectrais e multitemporais do IKONOS, usadas neste trabalho, foram realizadas em várias etapas, usando-se o modelo de transferência radiativa 6S e o método de subtração de objetos escuros (DOS).

**Método DOS** – A partir de uma inspeção visual das imagens, observou-se, para a imagem de 2001, a presença de uma sombra causada por uma nuvem na parte superior da imagem. Para

a faixa espectral do azul, nesta sombra, os pixels de menor valor eram iguais a 219 (DN = 219). Este valor foi subtraído do valor de cada pixel (DN - 219) da imagem inteira desta banda, deste mesmo ano. Os DN's "corrigidos" foram convertidos para radiância espectral e, posteriormente, para reflectância planetária (conforme seção 3.2.5).

**Método 6S** – Usando o software Msixs, uma versão para GNU/Linux do algoritmo 6S, desenvolvido por Gonzalez et al. (2000), foram gerados os índices de correção atmosférica (chamados de  $x_a$ ,  $x_b$  e  $x_c$ ) para cada um dos diversos valores de visibilidades e modelos de aerossóis. A partir destes índices, foram calculadas (conforme equações 3.3 e 3.4) as reflectâncias atmosféricamente corrigidas para a faixa do azul.

$$y = x_a \cdot L_\lambda - x_b \quad (3.3)$$

$$acr = y / [1 + (x_c \cdot y)] \quad (3.4)$$

onde  $acr$  é a reflectância com correção atmosférica.  $L_\lambda$  é a radiância espectral (Eq. 3.1) obtida a partir dos coeficientes de calibração do IKONOS.

As reflectâncias corrigidas pelo método DOS foram comparadas com as reflectâncias corrigidas pelo modelo 6S para determinação dos parâmetros de correção atmosférica mais satisfatórios.

O modelo de aerossóis e a visibilidade mais satisfatórios foram, então, usados para gerar os índices de correção atmosférica para as outras faixas espectrais (verde, vermelho e NIR) da imagem de 2001.

Para corrigir as imagens de 2000 e 2002, a imagem de 2001 foi usada como referência, tomando-se as medidas, na faixa espectral azul, de 10 pixels de referências do asfalto da BR-163. Considerando a mesma reflectância do asfalto para os três anos, foram então determinados os modelos de aerossóis e as visibilidades que resultassem em uma correção atmosférica satisfatória para as imagens de 2000 e 2002.

Os índices de correções atmosféricas gerados pelo algoritmo 6S foram usados para gerar reflectâncias corrigidas usando o programa LEGAL (ver apêndice A) e as planilhas eletrônicas de cálculo, segundo as fórmulas apresentadas nas equações 3.1, 3.3 e 3.4.

### 3.2.7 Simulação atmosférica

Na ausência de medidas de visibilidade, um dos parâmetros de entrada para o algoritmo 6S, para correção atmosférica, foram criados cenários para verificar a influência deste parâmetro sobre os valores de reflectância atmosféricamente corrigidos, NDVI e ARVI, para as imagens multitemporais do IKONOS (2000, 2001 e 2002).

Kaufman & Tanré (1992), para comparar a resistência do ARVI aos efeitos atmosféricos com a dependência atmosférica do NDVI, criaram três cenários atmosféricos: modelo de aerossóis continental com visibilidades de 25 km e 10 km, e modelo de aerossóis marítimo com visibilidade de 25 km. Os índices (NDVI e ARVI) foram aplicados a três tipos de cobertura vegetativa: grama, floresta e alfafa; e a dois tipos de solo; como função da fração da superfície coberta pela vegetação. A simulação dos efeitos atmosféricos foi feita usando o código 5S para as três faixas espectrais que compõem o ARVI (azul, vermelho e NIR).

Também usando o conceito de simulação atmosférica, Ferreira et al. (2003) criaram cinco cenários para simular as condições de turbidez (visibilidade) da atmosfera e os níveis de aerossóis, para verificar as respostas sazonais sobre o NDVI e o Índice de Vegetação Realçado (EVI – *Enhanced Vegetation Index*) de uma região de Cerrado.

Neste trabalho são criados cinco cenários de simulação atmosférica: cenário 1 “sem atmosfera”, simulando a ausência da atmosfera; os cenários 2 e 3 usam modelo de aerossóis continental (CO) com visibilidades de 20 km e 100 km, respectivamente; e os cenários 4 e 5 usam modelo de aerossóis de queima de biomassa (BB) com visibilidades de 20 km e 100 km, respectivamente. Os cinco cenários usados para simular as condições atmosféricas são resumidos na Tabela 10.

Tabela 10: Cenários com os vários modelos para simulação atmosférica

| Cenários | Modelo de aerossóis     | Visibilidade (km) |
|----------|-------------------------|-------------------|
| 1        | “sem atmosfera”         |                   |
| 2        | Continental (CO)        | 20                |
| 3        | Continental (CO)        | 100               |
| 4        | Queima de biomassa (BB) | 20                |
| 5        | Queima de biomassa (BB) | 100               |

Teor de vapor d’água e ozônio de 3,419 g/cm<sup>2</sup> e 0,246 atm-cm, respectivamente.

### 3.2.8 Análise espectral das imagens IKONOS

Para se fazer a análise espectral das imagens do IKONOS, os valores digitais (DN) foram extraídos usando-se a ferramenta “leitura de pixel” do Spring para as coordenadas de cada

caixa coletora de serrapilheira. Este procedimento realiza a leitura do pixel selecionado e, simultaneamente, a de outros 24 ao seu redor. Esses valores foram salvos em um arquivo de texto sem formatação que posteriormente foi convertido para uma tabela para ser usado em uma planilha eletrônica de cálculo.

Usando uma planilha eletrônica de cálculo e a partir dos DN's, a radiância espectral e a reflectância planetária, ou reflectância aparente, para cada faixa espectral do IKONOS foram calculadas, usando os coeficientes de calibração radiométrica e os valores de fluxo solar distribuídos e verificados pela NASA Science Data Purchase Project (KAUFMAN; TANRÉ, 1992; GOWARD et al., 2003; THENKABAIL et al., 2003; SPACE IMAGING, 2001).

Ainda com o auxílio da planilha, foram calculadas as reflectâncias espectrais atmosféricas corrigidas a partir das radiâncias espectrais e dos coeficientes gerados pelo algoritmo 6S para cada faixa espectral e para cada cenário.

### **3.2.9 Produção de serrapilheira versus reflectância, NDVI e ARVI**

O valores de produção de serrapilheira dos anos de 2001 e 2002 foram comparados com os valores de reflectância na faixa espectral do infravermelho próximo e com os valores de NDVI.

Como não se tinha o valor da taxa de produção de serrapilheira para os dias das aquisições das imagens IKONOS (19/05/2001 e 05/07/2002), foram feitas regressões para se estimar a produção para aquelas datas. Foram usadas os valores de duas coletas antes e duas posterior a data da imagem de cada ano. A produção de liteira foi comparada com os valores médios de reflectância, NDVI e ARVI dos 20 coletores, para cada ano.

A produção de serrapilheira de cada caixa coletora também foi comparada com os valores de reflectância, NDVI e ARVI, referentes às respectivas caixas. Neste caso, foram selecionados os valores de serrapilheira de uma data de coleta mais próxima a data da tomada da imagem.

## 4 Resultados e discussões

### 4.1 Produção de serrapilheira (2001 e 2002)

A produção de serrapilheira (apenas as folhas) para o ano de 2001 é apresentada na Figura 12. Observa-se que para este ano, a serrapilheira era coletada mensalmente.

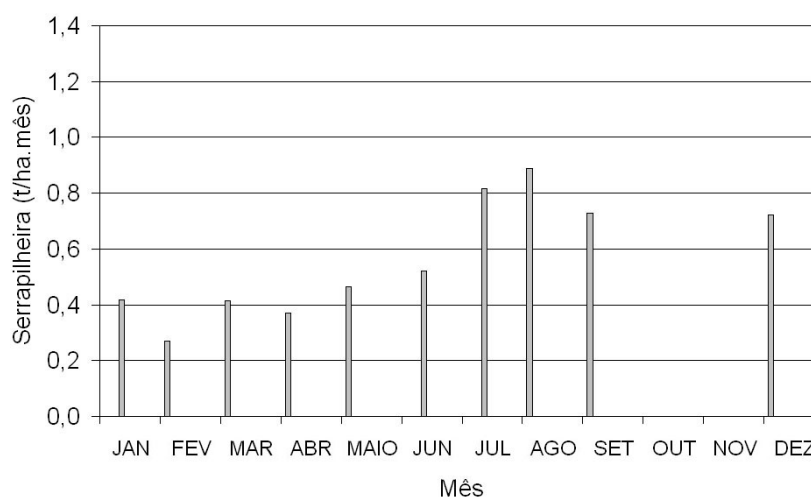


Figura 12: Produção de serrapilheira no ano de 2001

A máxima produção de serrapilheira ocorreu para a coleta do dia 06 de agosto, com um valor de 0,89 t/ha-mês. O valor estimado para o dia 19 de maio, data da imagem do IKONOS de 2001, é de 0,45 t/ha-mês.

A produção anual total de serrapilheira (folhas, galhos, frutos, flores, etc.) foi de cerca de 8,70 t/ha, enquanto o valor referente às folhas foi de 5,62 t/ha. Wieder & Wright (1995) encontraram valores anuais médios da ordem de 12,39 t/ha para os anos de 1986 a 1990, para uma floresta tropical no Panamá. Werneck et al. (2001) obtiveram produção anual de 6,78 t/ha para coletas de serrapilheira de julho de 1997 a agosto de 1998 na Estação Ecológica do Tripuí, Ouro Preto, MG, no trecho mais preservado da floresta semidecídua, “[...] não havendo relatos de perturbação, como a retirada de madeira, para os últimos trinta anos.”



No ano de 2002, o intervalo entre as coletas de serrapilheira passou a ser semanal, conforme a Figura 13. Verifica-se que a partir de maio deste ano, os intervalos entre as coletas não foram regulares.

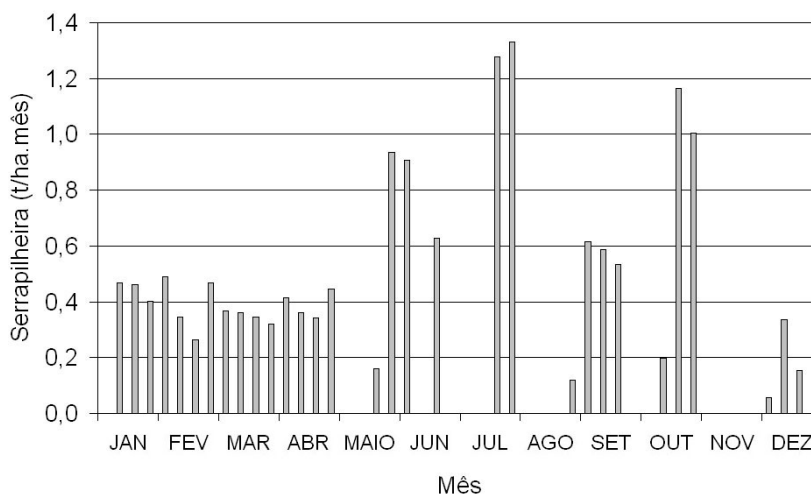


Figura 13: Produção de serrapilheira no ano de 2002

A produção de serrapilheira obteve um valor máximo de 1,33 t/ha·mês para a coleta do dia 29 de julho. Para a data da imagem do IKONOS (dia 05 de julho), a produção estimada de serrapilheira foi de cerca de 0,79 t/ha·mês.

A produção anual total de serrapilheira foi de cerca de 6,00 t/ha, enquanto que para serrapilheira composta somente de folhas foi de 5,86 t/ha.

## 4.2 Análise dos cenários

Os valores de reflectâncias, NDVI e ARVI, obtidos a partir de correções atmosféricas com cenários diferentes, foram comparados entre si. A Figura 14 apresenta as reflectâncias médias do dossel, na faixa espectral do vermelho, obtidas a partir das leituras de pixels das coordenadas das caixas coletoras de serrapilheira, para os diversos cenários, nos anos de 2000, 2001 e 2002.

Verifica-se que a reflectância na faixa do vermelho é fortemente influenciado pela presença da atmosfera. Os valores obtidos sem correção atmosférica são maiores do que os com correção. Tanto a visibilidade quanto os níveis de aerossóis, pré-estabelecidos nos modelos de aerossóis do algoritmo 6S, afetam os valores de reflectância; ocasionando variações de até 1,05%.

Percebe-se, também, que a reflectância de 2001 é maior do que as de 2000 e 2002 para todos os cenários, com exceção daquele em que a correção atmosférica não foi aplicada, mesmo

quando a comparação é feita entre cenários diferentes.

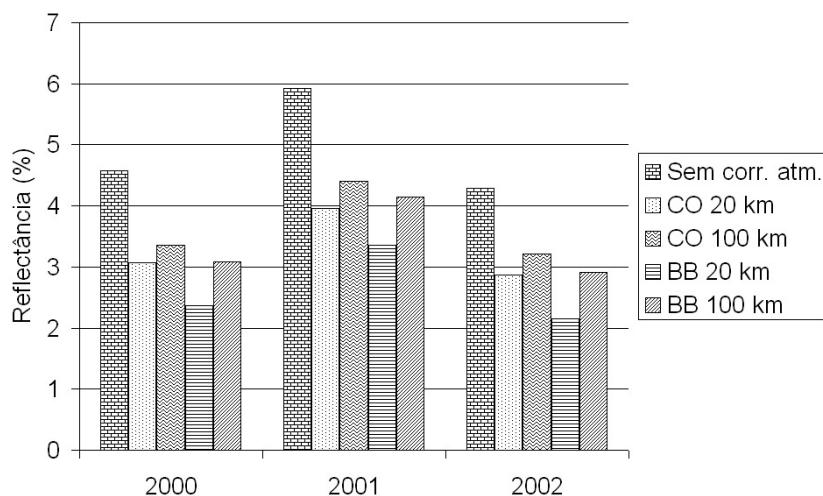


Figura 14: Comparações das reflectâncias médias na faixa do vermelho para vários cenários, onde CO e BB representam modelos de aerossóis continental e de queima de biomassa, respectivamente

A Figura 15 apresenta as reflectâncias médias para a faixa espectral do infravermelho próximo para os mesmos cenários da Figura 14.

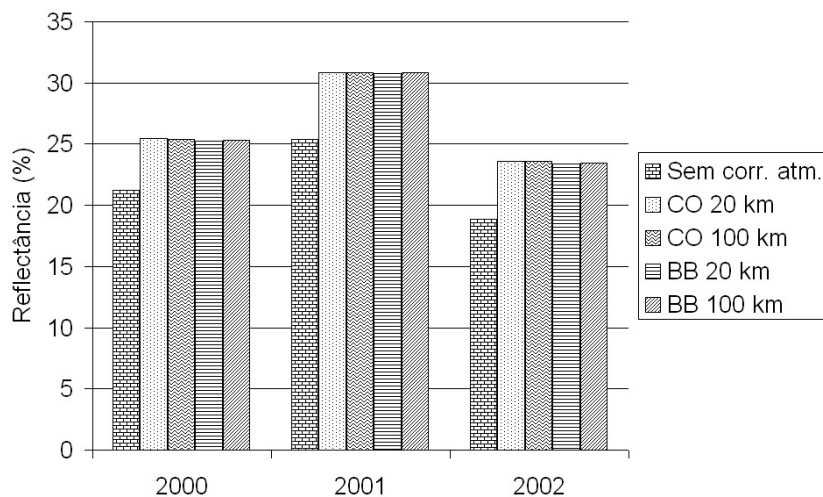


Figura 15: Comparações das reflectâncias médias na faixa do infravermelho próximo para vários cenários

Não houve diferença significativa entre valores de reflectâncias, quando comparadas para um mesmo ano, indicando que a faixa espectral do infravermelho próximo é mais resistente a variações nas condições atmosféricas.

As reflectâncias médias para a faixa espectral no infravermelho próximo foi de cerca de 25,5% para a imagem de 2000, 31,0% para 2001 e 23,5% para 2002.

A Figura 16 apresenta os valores do NDVI médios obtidos a partir dos valores de reflectâncias atmosféricamente corrigidas (vermelho e NIR) segundo os cenários anteriormente descritos. Verifica-se que os valores obtidos para o cenário sem correção atmosférica são menores do que os valores com correção. O cenário de queima de biomassa com visibilidade de 20 km apresenta os maiores valores.

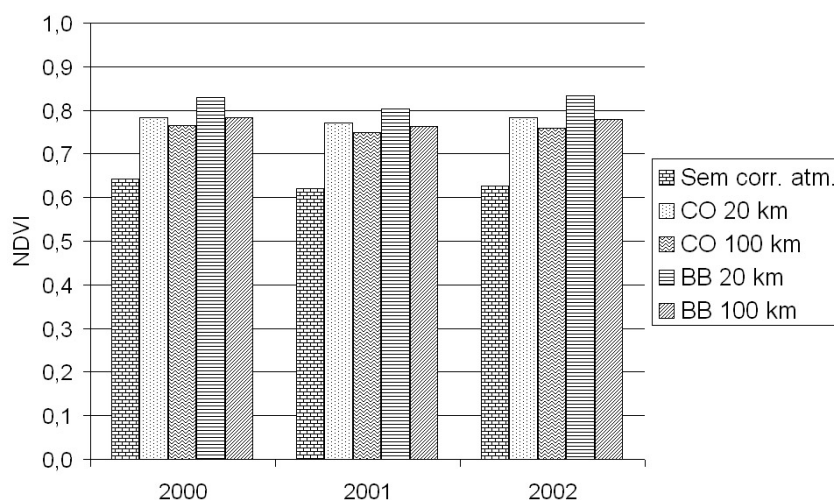


Figura 16: Comparações dos NDVI's para vários cenários

A Figura 17 apresenta um boxplot dos valores do NDVI para os cenários de correções atmosféricas para os três anos. Verifica-se a forte influência que a atmosfera causa nestes valores.

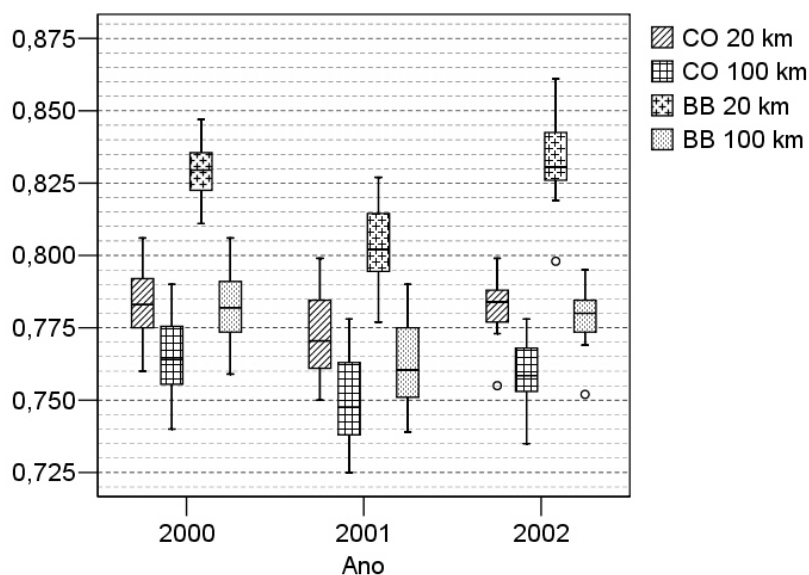


Figura 17: Boxplot para comparações dos NDVI's para vários cenários

Testes t entre duas amostras presumindo variâncias equivalentes foram realizados para comparar as médias dos NDVI's obtidos a partir de cada cenário, apresentando diferenças signifi-

tivas ( $p < 0,05$ ). A Tabela 11 apresenta os valores médios do NDVI com os desvios padrões.

Tabela 11: Médias e desvios (S.D.) dos NDVI's para os vários cenários

|                       | 2000  |       | 2001  |       | 2002  |       |
|-----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                       | Média | S.D.  | Média | S.D.  | Média | S.D.  |
| Cenário 2 - CO 20 km  | 0,783 | 0,012 | 0,772 | 0,014 | 0,783 | 0,009 |
| Cenário 3 - CO 100 km | 0,765 | 0,013 | 0,749 | 0,015 | 0,759 | 0,011 |
| Cenário 4 - BB 20 km  | 0,829 | 0,010 | 0,803 | 0,014 | 0,833 | 0,014 |
| Cenário 5 - BB 100 km | 0,782 | 0,012 | 0,762 | 0,014 | 0,779 | 0,009 |

A Figura 18 apresenta os valores do ARVI obtidos a partir dos valores de reflectâncias atmosféricamente corrigidos (azul, vermelho e NIR) segundo os cenários anteriormente descritos. Verifica-se que os valores sem correção atmosférica, ao contrário do que ocorre com o NDVI, são maiores dos que os valores com correção. Os cenários com modelo de aerossóis de queima de biomassa apresentam valores do ARVI maiores do que os cenários com modelo de aerossóis continental.

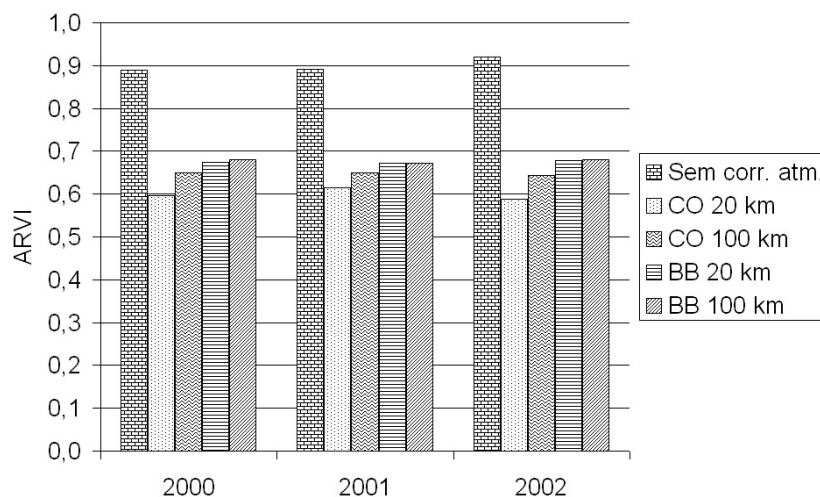


Figura 18: Comparações dos ARVI's para vários cenários

Para se verificar a “resistência” do ARVI à presença da atmosfera, foram realizados testes t entre as amostras presumindo variâncias equivalentes. Não houve diferença significativa ( $p = 0,221$ ,  $p = 0,997$  e  $p = 0,604$ , para os anos de 2000, 2001 e 2002, respectivamente) entre os valores do ARVI dos cenários 4 e 5 (queima de biomassa com visibilidade de 20 km e 100 km, respectivamente), entretanto, os valores dos cenários 2 e 3 (modelo de aerossóis continental com visibilidade de 20 km e 100 km, respectivamente) apresentaram valores significativamente diferentes ( $p < 0,05$  para os três anos). A Figura 19 apresenta um boxplot com os valores do ARVI e a Tabela 12 apresenta os valores médios do ARVI bem como os desvios padrões.

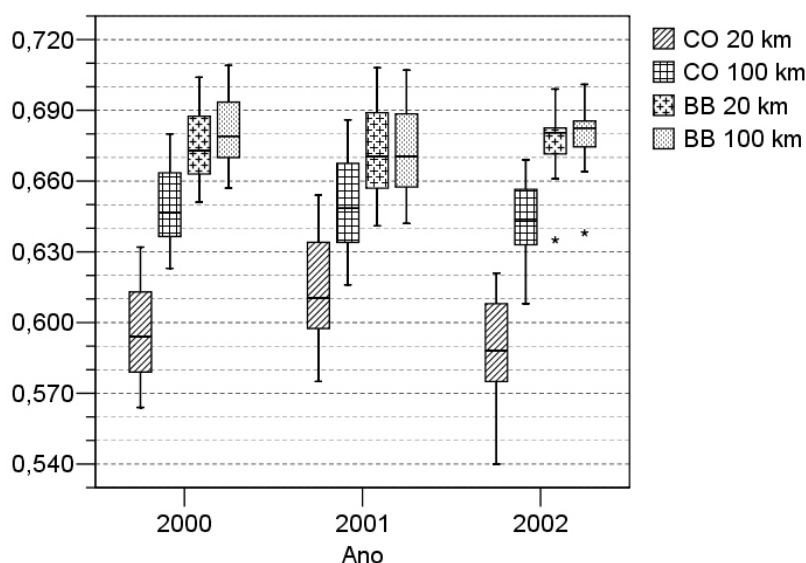


Figura 19: Boxplot para comparações dos ARVI's para vários cenários

Tabela 12: Médias e desvios (S.D.) dos ARVI's

|                       | 2000  |       | 2001  |       | 2002  |       |
|-----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                       | Média | S.D.  | Média | S.D.  | Média | S.D.  |
| Cenário 2 - CO 20 km  | 0,596 | 0,021 | 0,614 | 0,021 | 0,588 | 0,022 |
| Cenário 3 - CO 100 km | 0,649 | 0,017 | 0,650 | 0,019 | 0,644 | 0,015 |
| Cenário 4 - BB 20 km  | 0,675 | 0,015 | 0,672 | 0,019 | 0,678 | 0,014 |
| Cenário 5 - BB 100 km | 0,681 | 0,015 | 0,672 | 0,019 | 0,680 | 0,014 |

Kaufman & Tanré (1992), usando o código 5S, simularam três modelos de aerossóis: continental com visibilidade de 25 km e 10 km, e marítimo com visibilidade de 25 km. Encontraram, para uma área de floresta, variações do NDVI como função das condições atmosféricas de até  $\delta\text{NDVI} = 0,2$ , enquanto para o ARVI obtiveram valores dentro de  $\delta\text{ARVI} = 0,05$ .

Neste estudo, os valores do ARVI não foram significativamente “resistentes” à influência da atmosfera, para o modelo de aerossóis continental (ver Tabela 13), obtendo variações ( $\delta\text{ARVI}$ ) maiores do que as variações do NDVI ( $\delta\text{NDVI}$ ). Entretanto, para o modelo de aerossóis de queima de biomassa, as variações do ARVI foram significativamente menores do que as variações do NDVI.

Tabela 13: Variação dos valores do NDVI e do ARVI em função dos cenários

|                         | $\delta\text{NDVI}$ |       |       | $\delta\text{ARVI}$ |       |       |
|-------------------------|---------------------|-------|-------|---------------------|-------|-------|
|                         | 2000                | 2001  | 2002  | 2000                | 2001  | 2002  |
| Continental (CO)        | 0,018               | 0,023 | 0,024 | 0,053               | 0,036 | 0,056 |
| Queima de biomassa (BB) | 0,047               | 0,041 | 0,054 | 0,006               | 0,000 | 0,002 |

### 4.3 Correção atmosférica

Para a imagem IKONOS de 2001, foram comparadas as reflectâncias do dossel nas coordenadas das caixas coletoras de serrapilheira, na faixa espectral do azul, obtidas a partir da correção atmosférica feita pelo método de subtração de objetos escuros (DOS), com as reflectâncias, da mesma faixa espectral, obtidas a partir da correção atmosférica feita pelo modelo de transferência radiativo (6S). A Figura 20 apresenta a comparação entre estas reflectâncias obtidas pelos dois métodos.

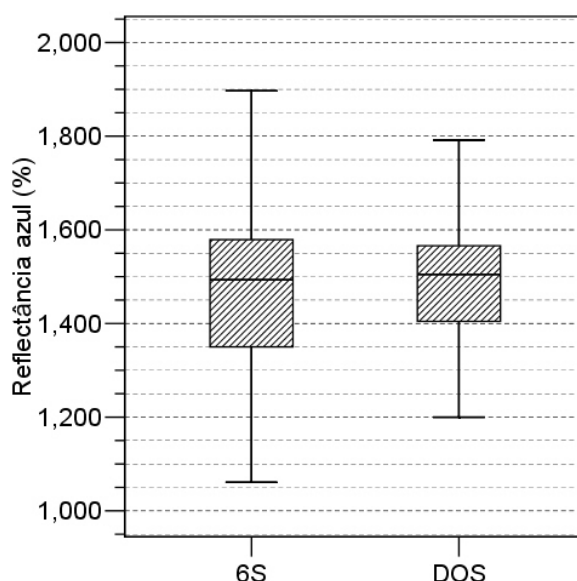


Figura 20: Comparação entre as reflectâncias do dossel, na faixa espectral azul, obtidas a partir da correção atmosférica feita pelo método de subtração de objetos escuros com a obtida pelo método 6S, com modelo de aerossóis continental e visibilidade de 34 km.

Verifica-se uma discordância de cerca de 0,02% entre os valores, entretanto, esta discordância não é significativa ( $p = 73,1\%$ ) de acordo com um teste t presumindo variâncias equivalentes, indicando que as correções pelos dois métodos são equivalentes.

A imagem de 2001, após ter sido corrigida atmosféricamente, foi usada como referência para corrigir as de 2000 e 2002. A Figura 21 apresenta os valores de reflectância para a faixa do azul dos pixels de referência do asfalto. Observa-se discordâncias entre as três datas de cerca de 0,03% (2000 - 2001) e 0,18% (2001 - 2002). Estas discordâncias, entretanto, não são significativas ( $p > 0,05$ ) para um teste não-paramétrico de Mann-Whitney (teste U), indicando uma correção atmosférica satisfatória para as imagens.

A Tabela 14 resume os modelos de aerossóis e as visibilidades usados nas correções atmosféricas das imagens IKONOS de 2000, 2001 e 2002.

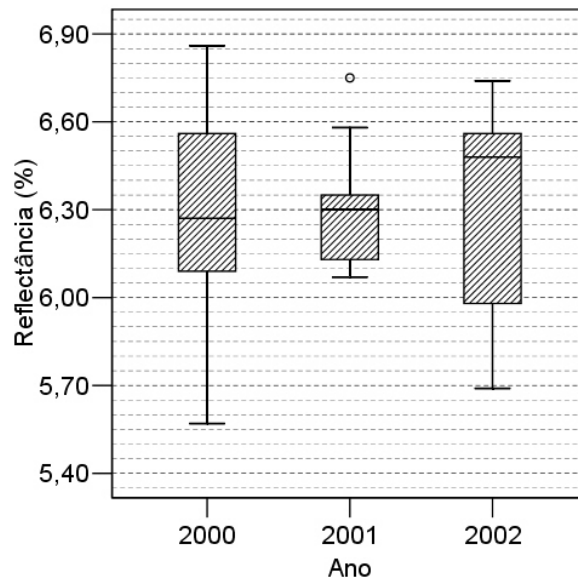


Figura 21: Boxplot de reflectância azul de pixels de referência do asfalto para os três anos

Tabela 14: Parâmetros para correção atmosférica das imagens IKONOS

| Anos | Modelo de aerossóis | Visibilidade (km) |
|------|---------------------|-------------------|
| 2000 | Continental         | 100               |
| 2001 | Continental         | 34                |
| 2002 | Continental         | 26                |

Os parâmetros de entrada do algoritmo 6S, além dos parâmetros de visibilidade e modelo de aerossóis, foram:

- Condições geométricas para cada imagem, levando-se em conta a elevação e o azimute do sol e a elevação e o azimute do sensor;
- Modelo atmosférico tropical;
- Superfície homogênea vegetativa;
- Altitude de 400 m;

#### 4.4 Variação sazonal, NDVI e ARVI

Após a correção atmosférica, as imagens IKONOS dos três anos foram comparadas entre si para verificar a influência da variação sazonal sobre os valores do NDVI e do ARVI.

#### 4.4.1 NDVI

A Figura 22 apresenta um boxplot dos NDVI's obtidos a partir da leitura dos pixels das coordenadas das caixas de coletas de liteira para os três anos, e a Tabela 15 apresenta os valores médios e os desvios.

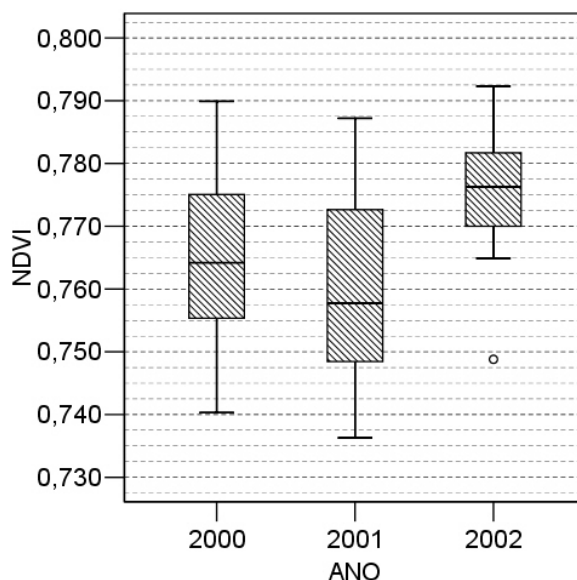


Figura 22: Valores do NDVI para os três anos obtidos a partir das imagens com correção atmosférica

Tabela 15: Média dos NDVI's e desvios padrões para imagens com correção atmosférica

|       | 2000  | 2001  | 2002  |
|-------|-------|-------|-------|
| Média | 0,765 | 0,760 | 0,776 |
| S.D.  | 0,013 | 0,014 | 0,009 |

Verifica-se que o NDVI médio da imagem de 30 de abril 2000 é maior do que o NDVI da imagem de 19 de maio de 2001, indicando uma diminuição nas condições da vegetação (e.g. estresse hídrico) – ver Moreira (2001) e Lillesand & Kiefer (1994). Por outro lado, observa-se que o NDVI médio da imagem de 05 de julho 2002 é maior do que o de 19 de maio de 2001.

De acordo com Raiter et al. (2002) e Sanches et al. (2003), o período de seca nessa região começa em abril, portanto, a falta de chuva até o mês de julho explica o aumento da queda de serrapilheira devido ao longo período de estresse hídrico. Neste período, a produção de serrapilheira é maior do que no restante do ano, conforme visto anteriormente nas Figuras 12 e 13.

Sendo assim, devido ao estresse hídrico, esperava-se que o valor médio do NDVI para a imagem de 05 de julho de 2002 fosse menor do que os das imagens de 30 de abril de 2000 e 19



de maio de 2001.

A Figura 23 apresenta a curva de reflectância espectral de folhas verdes e senescentes. Verifica-se que, no período de seca, as folhas diminuem a reflectância espectral na faixa do infravermelho próximo, enquanto na região do visível, a reflectância aumenta. Entretanto, conforme visto na figura 14, a reflectância espectral do vermelho para a imagem de 05 de julho de 2002 foi menor do que a de 19 de maio de 2001, ocasionando um aumento nos valores do NDVI.

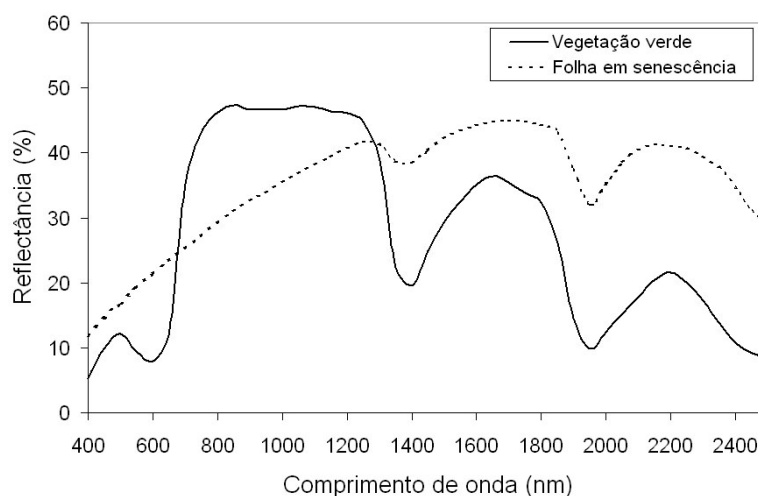


Figura 23: Curvas de reflectância espectral de folhas verdes e senescentes. Adaptada de: Moreira (2001), p. 82.

A partir de medidas de radiação fotossinteticamente ativa (PAR) incidentes no dossel e refletida pelo dossel, obtidas a partir de sensores instalados na torre de coleta de dados micro-meteorológicos, as razões entre a PAR refletida pelo dossel e a PAR incidente ( $PAR_r/PAR_i$ ) foram calculadas e apresentadas por Raiter et al. (2002), indicando uma tendência decrescente a partir de julho. As medidas de  $PAR_r/PAR_i$  do ano de 2001 são apresentadas na Figura 24.

Os valores de  $PAR_r/PAR_i$  do dia 19 de maio de 2001 (dia juliano 139), das 8 h às 17 h 30 min, foram comparados com os de 05 de julho de 2002 (dia juliano 186), do mesmo período. O valor médio para o primeiro caso foi de 0,0453 e desvio padrão de 0,0049, enquanto para o segundo foi de 0,0485 e desvio padrão de 0,0044. Estas médias são considerados significativamente diferentes para um teste t entre duas amostras presumindo variâncias equivalentes ( $p < 0,05$ ), indicando que a razão média  $PAR_r/PAR_i$  do dia 05 de julho de 2002 é maior do que a do dia 19 de maio de 2001, em concordância com a Figura 23. Entretanto, este resultado não está de acordo com a reflectância espectral do vermelho obtido a partir das imagens IKONOS (conforme a Figura 14 da seção 4.2).

Estudos recentes feitos por Goward et al. (2003), Pagnutti et al. (2003) e Ryan et al. (2003)

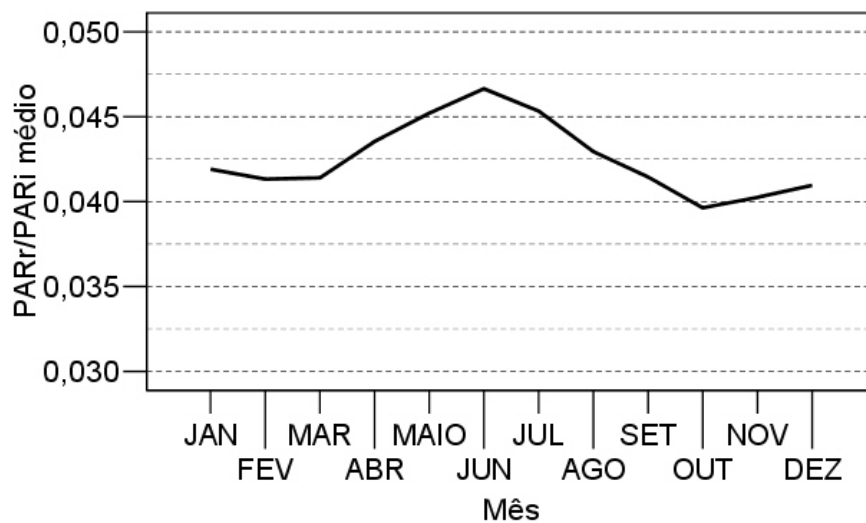


Figura 24: Razão entre a radiação fotossinteticamente ativa refletida pelo dossel e a incidente (PARr/PARi) para o ano de 2001

avaliaram o efeito do processamento feito pela Space Imaging, denominado compensação da função de transferência de modulação (MTFC – Modulation Transfer Function Compensation), sobre as imagens do IKONOS. Para isso foram usadas imagens geradas com e sem o MTFC de uma região urbana (Phoenix, AZ) com áreas vegetativas. Estes estudos revelaram que, embora a imagem com MTFC aparecia visualmente mais nítida, também alterava as medidas multiespectrais para todas as bandas, escurecendo os pixels mais escuros e clareando os pixels mais claros, ou, em outras palavras, levando a zero alguns pixels e saturando outros. Como os índices de vegetação faz um contraste entre as medidas do visível e do infravermelho próximo, o MTFC amplifica consideravelmente estes índices.

Portanto, este processamento feito pela Space Imaging, pode ser o responsável pela discordância dos valores de reflectância espectral do vermelho quando comparados com as medidas PARr/PARi e também pelo aumento nos valores do NDVI para a imagem de 2002 em relação às de 2000 e 2001, quando se esperava uma diminuição destes valores.

#### 4.4.2 ARVI

As comparações dos valores do ARVI dos anos de 2000, 2001 e 2002, são apresentadas na Figura 25.

Diferentemente do NDVI, o ARVI apresentou valores decrescentes para os anos 2000, 2001 e 2002, nesta seqüência. Testes t indicaram diferenças significativas ( $p < 0,05$ ) entre 2002 e 2001, e entre 2001 e 2002. A Tabela 16 resume os valores médios do ARVI e os desvios.

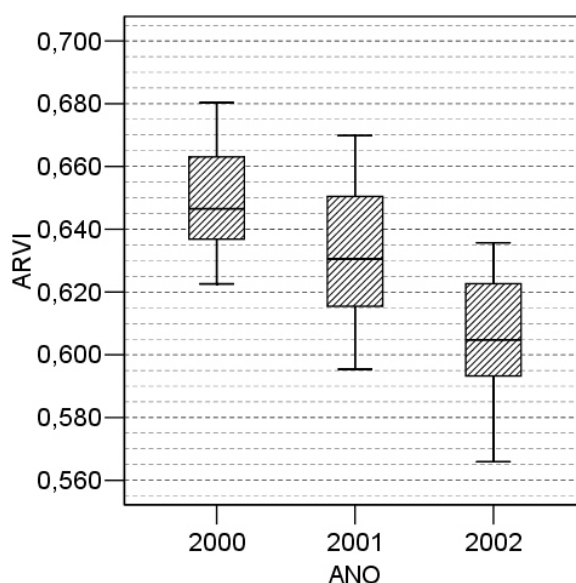


Figura 25: Valores do ARVI para os três anos obtidos a partir das imagens com correção atmosférica

Tabela 16: Média dos ARVI's e desvios padrões para imagens com correção atmosférica

|       | 2000  | 2001  | 2002  |
|-------|-------|-------|-------|
| Média | 0,649 | 0,632 | 0,606 |
| S.D.  | 0,016 | 0,020 | 0,019 |

Portanto, para o período de maior estresse hídrico da floresta, o valor médio do ARVI mostrou-se menor do que os valores das outras épocas.

## 4.5 Reflectâncias na faixa espectral do vermelho e do NIR, NDVI e ARVI

Os gráficos a seguir apresentam as reflectâncias espectrais para a faixa do vermelho e do infravermelho próximo, bem como os valores do NDVI e do ARVI.

Cada ponto representa a reflectância, ou índice vegetativo, correspondente a coordenada de uma caixa coletora de serrapilheira. O valor da reflectância de cada ponto foi obtido a partir da média dos 25 pixels que foram lidos para cada caixa coletora.

A Figura 26 apresenta a reflectância aparente para a faixa espectral do vermelho enquanto a 27 apresenta a reflectância com correção atmosférica atribuindo uma visibilidade de 100 km para o ano de 2000, 34 km para 2001 e 26 km para 2002, todos com modelo de aerossóis continental.

Percebe-se que os valores de reflectâncias do ano de 2002 foram menores do que os valores

de 2000 e de 2001, indicando uma maior absorção nesta faixa espectral.

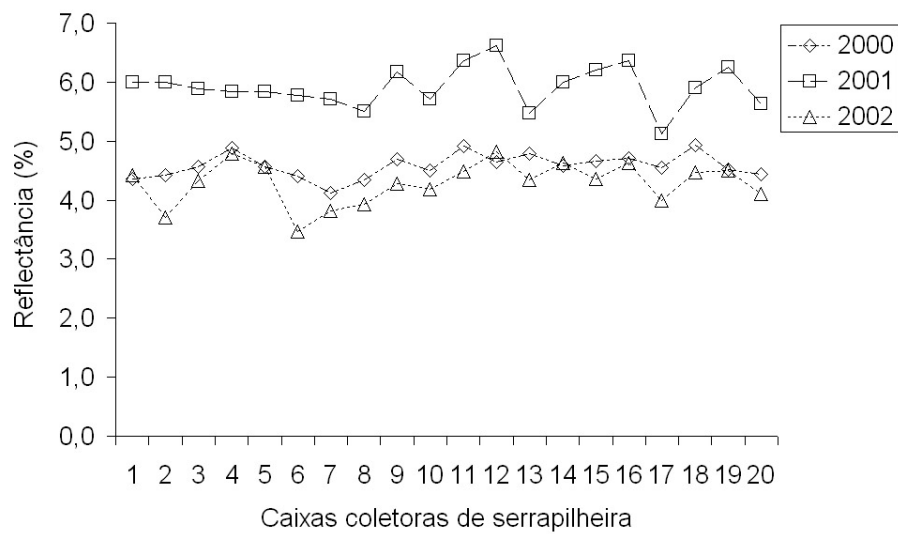


Figura 26: Reflectância aparente para a faixa do vermelho. Anos: 2000, 2001 e 2002

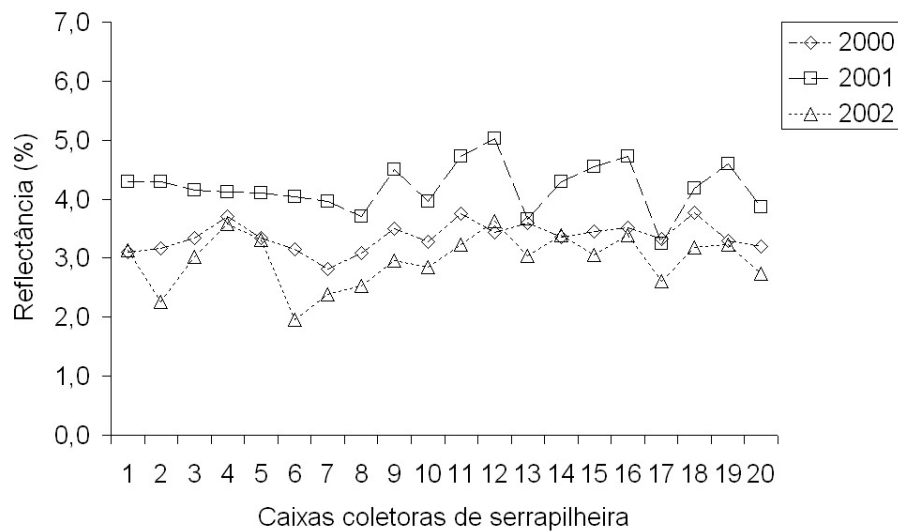


Figura 27: Reflectância para a faixa do vermelho, com correção atmosférica. Anos: 2000, 2001 e 2002

A Figura 28 apresenta a reflectância aparente para a faixa espectral do infravermelho próximo, enquanto a Figura 29 apresenta a reflectância na faixa do infravermelho próximo com correção atmosférica atribuindo uma visibilidade de 100 km para o ano de 2000, 34 km para 2001 e 26 km para 2002, todos com modelo de aerosol continental.

Observa-se que os valores de reflectâncias NIR sem correção atmosférica são da ordem de 21%, 25% e 19%, para os anos de 2000, 2001 e 2002, respectivamente, enquanto que os valores com correção atmosférica são da ordem de 25%, 31% e 24%, para os anos de 2000, 2001 e 2002, respectivamente.

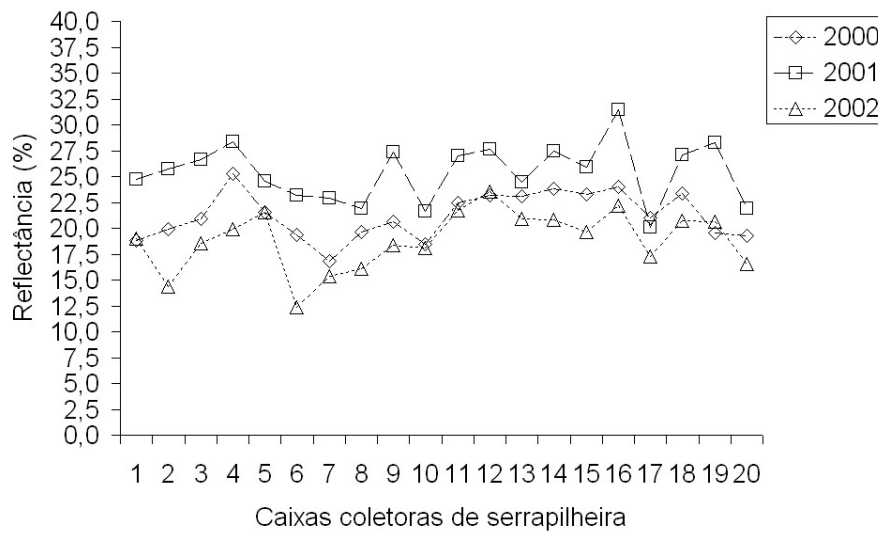


Figura 28: Reflectância aparente para a faixa do infravermelho próximo. Anos: 2000, 2001 e 2002

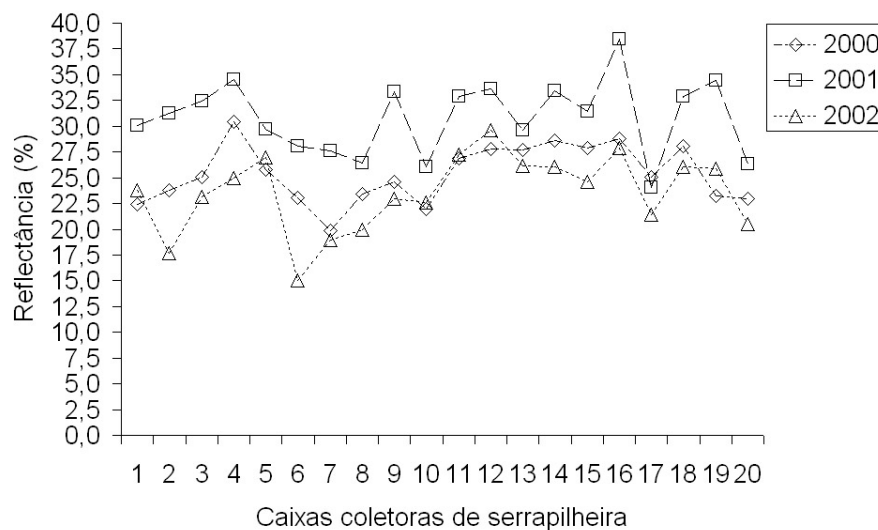


Figura 29: Reflectância para a faixa do infravermelho próximo, com correção atmosférica. Anos: 2000, 2001 e 2002

A Figura 30 apresenta os valores do NDVI calculados a partir dos valores de reflectâncias aparentes das faixas espectrais do vermelho e do infravermelho próximo.

A Figura 31 apresenta o NDVI obtido a partir dos valores de reflectâncias corrigidas do vermelho e do infravermelho próximo usando o cenário real.

Verifica-se um aumento nos valores do NDVI para o ano de 2002 quando comparados com os valores de 2000 e 2001. A imagem de 2002, como já mencionada, foi obtida em uma época em que a produção de serrapilheira é, normalmente, maior do que as de outras épocas do ano. Verifica-se que os valores médios do NDVI com correção atmosférica são da ordem de 0,77

enquanto que os valores sem correções são da ordem 0,63.

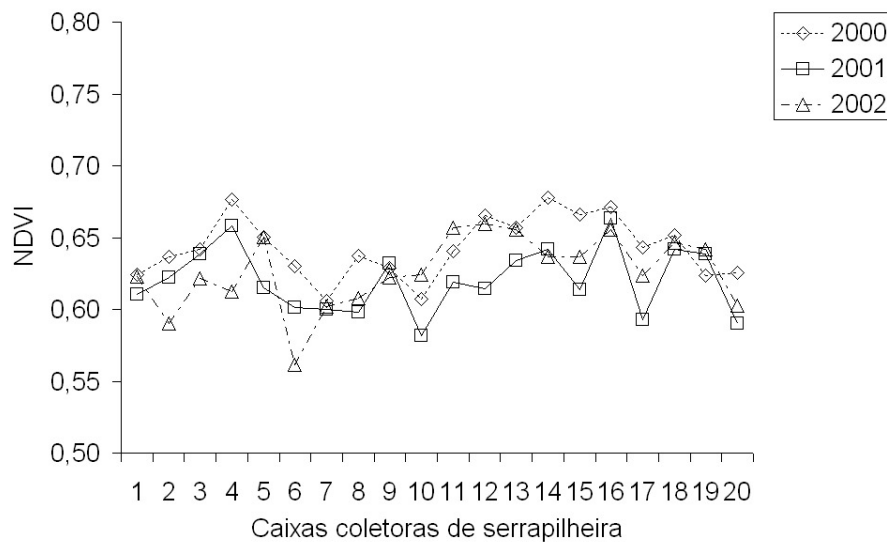


Figura 30: Valores do NDVI sem correção atmosférica. Anos: 2000, 2001 e 2002

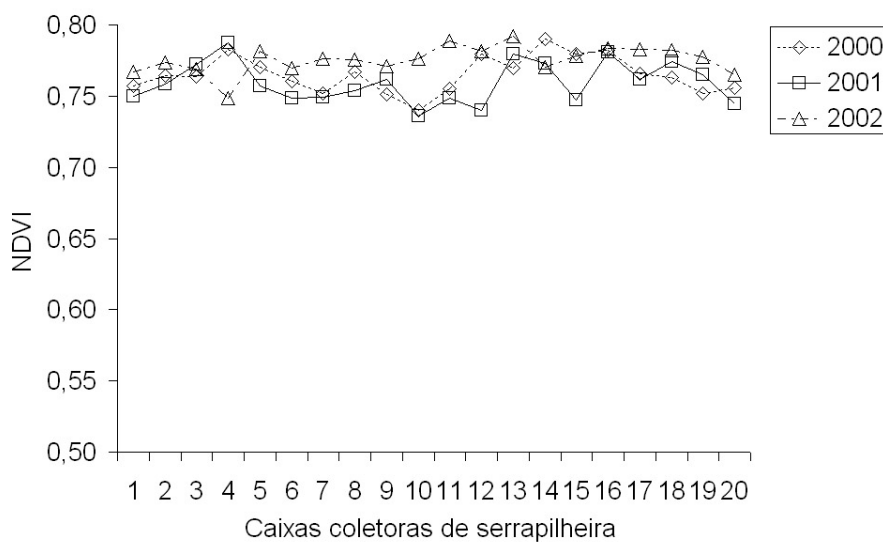


Figura 31: NDVI com correção atmosférica. Anos: 2000, 2001 e 2002

A Figura 32 apresenta o ARVI obtido a partir dos valores de reflectâncias atmosféricamente corrigidas das faixas espectrais do azul, vermelho e infravermelho próximo.

Observa-se que os valores do ARVI para a imagem de 30 de abril de 2000 obteve valores da ordem de 0,65, para a imagem de 19 de maio de 2001 obteve valores da ordem de 0,63, e para a imagem de 05 de julho de 2002, 0,61.

A Figura 33 apresenta três imagens NDVI da área de estudo. As imagens foram obtidas a partir dos valores de reflectâncias atmosféricamente corrigidas das faixas espectrais do vermelho e do infravermelho próximo. A imagem da esquerda é de 30 de abril de 2000, a do meio

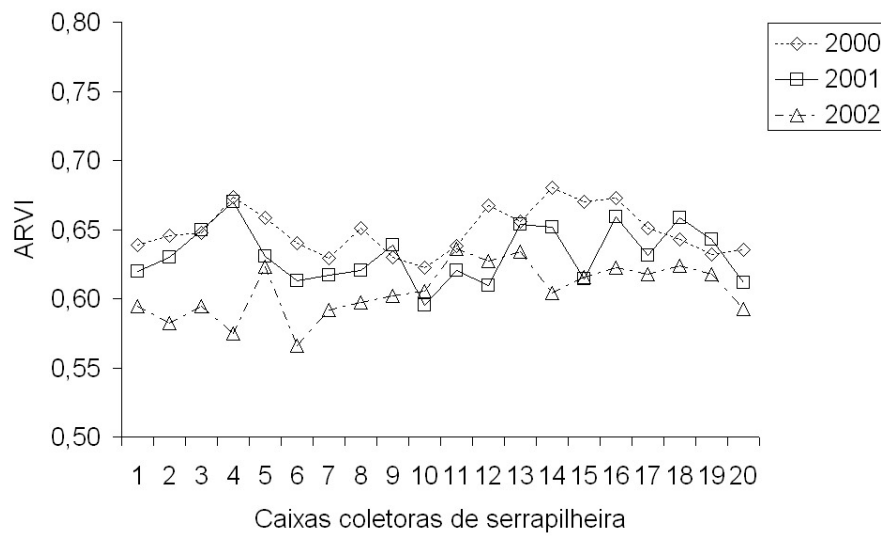


Figura 32: ARVI com com correção atmosférica. Anos: 2000, 2001 e 2002

é de 19 de maio de 2001, e a da esquerda é de 05 de julho de 2002, A marca na região central de cada imagem indica a localização dos pontos de coleta da serrapilheira e da torre medidas micrometeorológicas.

A partir da análise dessas imagens, pode-se observar a dinâmica do desmatamento. As imagens de 2001 e 2002 indicam uma grande área de desmatamento que não existia na época da tomada da imagem de 2000.

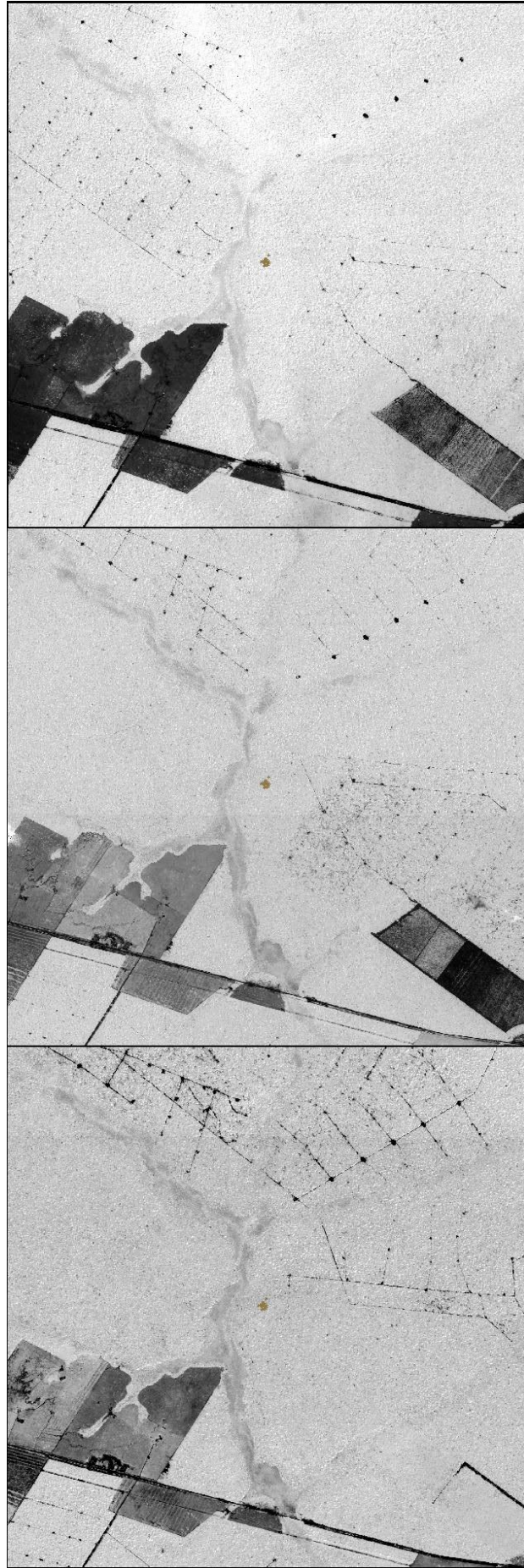


Figura 33: Imagens NDVI com correções atmosféricas. A imagem da esquerda é de 30/04/2000; a do meio de 19/05/2001; e a da direita, de 05/07/2002



## 4.6 Reflectância, NDVI e ARVI versus produção de serrapilheira

Os gráficos a seguir foram obtidos a partir da regressão linear dos valores de reflectância, NDVI e ARVI em função da produção de serrapilheira (em toneladas por hectare por mês).

A data da coleta de serrapilheira foi escolhida para ser a mais próxima da data de cada imagem; sendo para a imagem de 2001 a data de 09 de maio e para a imagem de 2002 a coleta de 21 de junho.

A Figura 34 apresenta a reflectância do infravermelho próximo em função da produção de serrapilheira. Verifica-se, a partir do valor de  $R^2$ , uma baixa correlação entre a produção de serrapilheira e a reflectância NIR. A inclinação negativa da curva sugere que com o aumento da produção de serrapilheira, a reflectância NIR diminui.

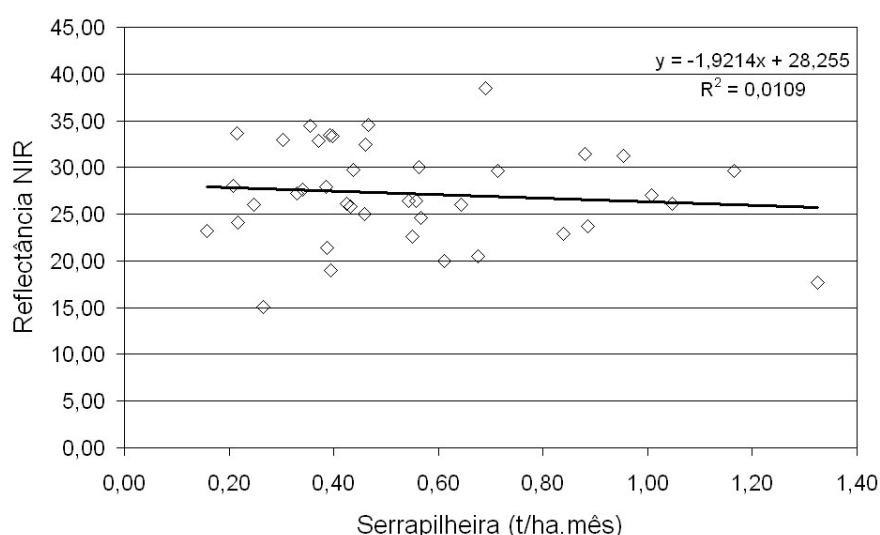


Figura 34: Relação entre a reflectância NIR da imagem IKONOS com a produção de serrapilheira

A Figura 35 apresenta a reflectância da faixa espectral do vermelho em função da produção de serrapilheira. Novamente, verifica-se uma baixa correlação entre os dados. A inclinação negativa da curva sugere que com o aumento da produção de serrapilheira, a reflectância do vermelho diminui.

A Figura 36 apresenta os valores do NDVI em função da produção de serrapilheira. Os dados do NDVI também não apresentam correlação significativa com a produção de serrapilheira. Entretanto, ao contrário dos gráficos 34 e 35, nota-se uma inclinação positiva da reta de tendência, indicando um aumento dos valores do NDVI com a produção de serrapilheira.

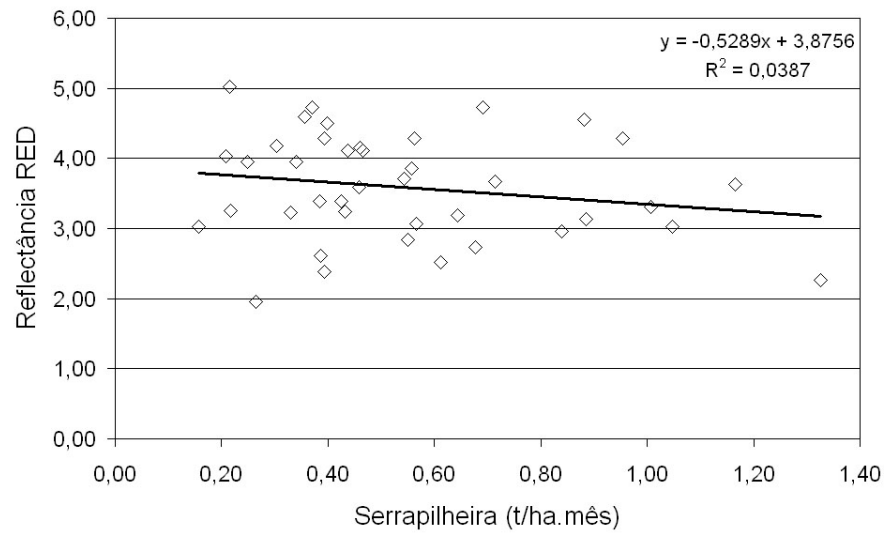


Figura 35: Relação entre a reflectância do vermelho da imagem IKONOS com a produção de serrapilheira

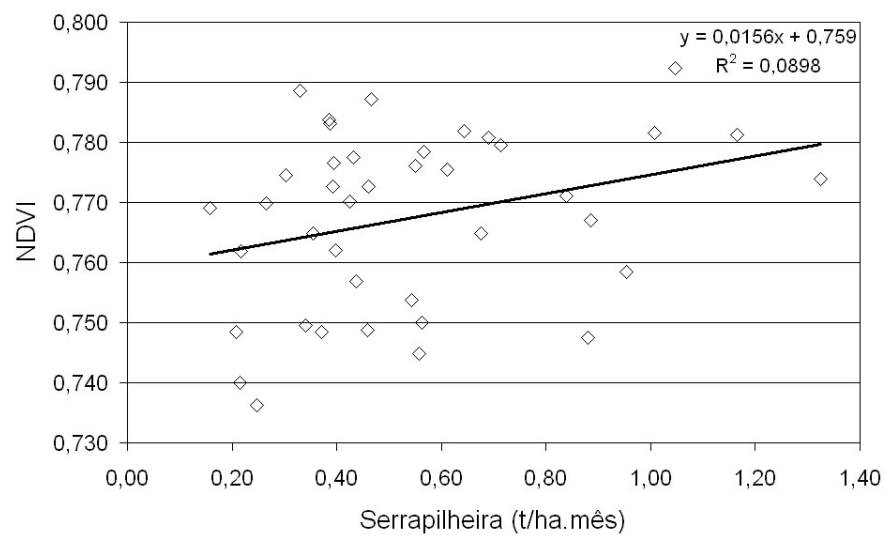


Figura 36: Relação entre o NDVI da imagem IKONOS e a produção de serrapilheira

A Figuras 37 apresenta os valores do ARVI em função da produção de serrapilheira. Novamente, verifica-se que não existe uma correlação significativa entre estes dados, entretanto, a inclinação negativa da reta de tendência sugere que com o aumento da produção de serrapilheira os valores do ARVI diminuem.

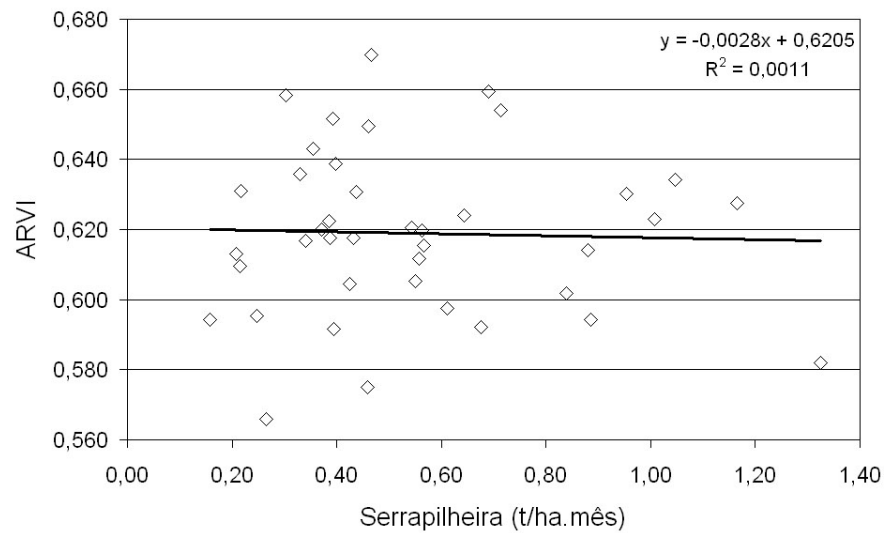


Figura 37: Relação entre o ARVI da imagem IKONOS e a produção de serrapilheira

## 5 Conclusões

Verificou-se que no período de maior produção de serrapilheira, a reflectância na faixa do infravermelho próximo atinge valores menores do que nos outros períodos, indicando, portanto, um estresse hídrico das plantas para este período.

A reflectância na faixa do vermelho também apresentou valores menores para o período de maior produção de serrapilheira.

A diminuição da reflectância na faixa espectral do vermelho não está de acordo com a razão  $PAR_r/PAR_i$  obtida a partir das medidas de radiação fotossinteticamente ativa incidente e refletida pelo dossel feitas por sensores instalados na torre de coletas de dados micrometeorológicos.

Com a diminuição da reflectância na faixa do vermelho, o NDVI apresentou um aumento para esse período de maior produção de serrapilheira.

O NDVI apresentou valores diferentes para cada tipo de cenário de correção atmosférica, enquanto o ARVI mostrou-se mais resistente para o cenário de queima de biomassa, indicando que o ARVI é mais resistente às influências da atmosfera do que o NDVI.

A reflectância na faixa do infravermelho próximo mostrou-se menos sensível às influências da atmosfera, por outro lado, a reflectância da faixa espectral do vermelho apresentou-se mais sensível. Isto acontece porque o efeito da atmosfera sobre o sinal detectado é composto da radiação de atalho que aumenta o sinal detectado e da transmissão que atenua este o sinal. Para superfície com baixa reflectância ( $\rho < 0,1$ ), por exemplo, para vegetação na faixa do vermelho, o efeito atmosférico líquido é um aumento no sinal detectado. Para superfície com reflectância maior ( $\rho > 0,15$ ), por exemplo, para maioria das superfícies na faixa do infravermelho próximo, o efeito líquido é uma mistura dos dois. Como resultado, o efeito atmosférico na faixa do vermelho é maior do que na faixa do infravermelho próximo (KAUFMAN; TANRÉ, 1992).

Não houve correlação significativa entre as reflectâncias do vermelho e do infravermelho próximo, os índices de vegetação NDVI e ARVI, medidos a partir das coordenadas de cada caixa coletora, quando comparados com a produção de serrapilheira. Entretanto, verificou-se

que com o aumento da produção de serrapilheira (produção de julho de 2002 comparada com a de maio de 2001), as reflectâncias do vermelho e do infravermelho próximo e o índice ARVI diminuíram, enquanto os valores do NDVI aumentaram.

A imprecisão nas medidas das coordenadas geográficas das caixas coletoras de serrapilheira, tomadas por GPS, e a reflectância espectral de cada coordenada obtida como média de 25 pixels, pode ter influenciado o resultado final.

As medidas de visibilidades, nos dias em que as imagens são tomadas, são parâmetros importantes para uma correção atmosférica satisfatória, como observou-se para a imagem de 2000, em que a visibilidade estimada estava muito acima do que normalmente se encontra nesta região nesta época do ano.

O processamento feito pela Space Imaging, MTFC, tem de ser levado em consideração. De acordo com Pagnutti et al. (2003), nos casos “[...] onde a radiometria é importante, imagens sem o processamento MTFC é preferível.”

## Referências

- AASE, J. K.; TANAKA, D. L. Reflectance from four wheat residue cover densities as influenced by three soil backgrounds. **Agronomy Journal**, v. 83, p. 753–757, 1991.
- CÂMARA, G.; SOUZA, R. C. M.; FREITAS, U. M.; GARRIDO, J. Spring: Integrating remote sensing and GIS by object-oriented data modelling. **Computers & Graphics**, v. 20, n. 3, p. 395–403, May–Jun 1996.
- CHAVEZ, P. S. An improved dark-object subtraction technique for atmospheric scattering correction of multispectral data. **Remote Sensing of Environment**, v. 24, p. 459–479, 1988.
- DAUGHTRY, C. S. T.; HUNT JR., E. R.; MCMURTREY III, J. E. Assessing crop residue cover using shortwave infrared reflectance. **Remote Sensing of Environment**, v. 90, n. 1, p. 126–134, March 2004.
- DIAL, G.; BOWEN, H.; GERLACH, F.; GRODECKI, J.; OLESZCZUK, R. IKONOS satellite, imagery, and products. **Remote Sensing of Environment**, v. 88, n. 1-2, p. 23–36, November 2003.
- FERREIRA, L. G.; YOSHIOKA, H.; HUETE, A.; SANO, E. E. Seasonal landscape and spectral vegetation index dynamics in the Brazilian Cerrado: An analysis within the Large-Scale Biosphere-Atmosphere Experiment in Amazônia (LBA). **Remote Sensing of Environment**, v. 87, n. 4, p. 534–550, November 2003.
- FLORENZANO, T. G. **Imagens de Satélite para estudos ambientais**. São Paulo: Oficina de Textos, 2002.
- GITELSON, A. A.; KAUFMAN, Y. J.; MERZLYAK, M. N. Use of a green channel in remote sensing of global vegetation from EOS-MODIS. **Remote Sensing of Environment**, v. 58, p. 289–298, 1996.
- GITELSON, A. A.; KAUFMAN, Y. J.; STARK, R.; RUNDQUIST, D. Novel algorithms for remote estimation of vegetation fraction. **Remote Sensing of Environment**, v. 80, n. 1, p. 76–87, April 2002.
- GOLLEY, F. B. **Ciclagem de minerais em um ecossistema de floresta tropical úmida**. Tradução de Eurípides Malavolta. São Paulo: EPU. Ed. da Universidade de São Paulo, 1978.
- GONZALEZ, L. et al. Laboratoire d'Optique Atmosphérique Université des Sciences et Technologies de Lille 59655 Villeneuve d'Ascq Cedex - France. **Second Simulation of Satellite Signal in the Solar Spectrum (Motif version)**, 2000. Disponível em: <http://www-loa.univ-lille1.fr/Msixs/> e <http://modis-land.gsfc.nasa.gov/mod09/msixs.htm>. Acesso em: 12 de maio de 2004.

GOWARD, S. N.; DAVIS, P. E.; FLEMING, D.; MILLER, L.; TOWNSHEND, J. R. Empirical comparison of Landsat 7 and IKONOS multispectral measurements for selected Earth Observation System (EOS) validation sites. **Remote Sensing of Environment**, v. 88, n. 1-2, p. 80–99, November 2003.

HURTT, G.; XIAO, X.; KELLER, M.; PALACE, M.; ASNER, G. P.; BRASWELL, R.; BRONDÍZIO, E. S.; CARDOSO, M.; CARVALHO, C. J. R.; FEARON, M. G.; GUILD, L.; HAGEN, S.; HETRICK, S.; MOORE III, B.; NOBRE, C.; READ, J. M.; SÁ, T.; SCHLOSS, A.; VOURLITIS, G.; WICKEL, A. J. IKONOS imagery for the Large Scale Biosphere–Atmosphere Experiment in Amazonia (LBA). **Remote Sensing of Environment**, v. 88, n. 1-2, p. 111–127, November 2003.

KAUFMAN, Y. J.; TANRÉ, D. Atmospherically resistant vegetation index (ARVI) for EOS-MODIS. **Geoscience and Remote Sensing**, v. 30, n. 2, 1992.

LEITÃO FILHO, H. F.; PAGANO, S. N.; CESAR, O.; TIMONI, J. L.; RUEDA, J. J. **Ecologia da Mata Atlântica em Cubatão (SP)**. São Paulo: EDUNESP/EDUNICAMP, 1993.

LILLESAND, T. M.; KIEFER, R. W. **Remote sensing and image interpretation**. 3rd. ed. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1994.

MOREIRA, M. A. **Funcionamento do sensoriamento remoto e metodologias de aplicação**. 1a. ed. São José dos Campos: INPE, 2001. 250 p.

NAGLER, P. L.; DAUGHTRY, C. S. T.; GOWARD, S. N. Plant litter and soil reflectance. **Remote Sensing of Environment**, v. 71, n. 2, p. 207–215, February 2000.

NAGLER, P. L.; GLENN, E. P.; HUETE, A. R. Assessment of spectral vegetation indices for riparian vegetation in the Colorado river delta, Mexico. **Journal of Arid Environments**, v. 49, n. 1, p. 91–110, September 2001.

NAGLER, P. L.; INOUE, Y.; GLENN, E. P.; RUSS, A. L.; DAUGHTRY, C. S. T. Cellulose absorption index (CAI) to quantify mixed soil-plant litter scenes. **Remote Sensing of Environment**, v. 87, n. 2-3, p. 310–325, October 2003.

PAGNUTTI, M.; RYAN, R. E.; KELLY, M.; HOLEKAMP, K.; ZANONI, V.; THOME, K.; SCHILLER, S. Radiometric characterization of IKONOS multispectral imagery. **Remote Sensing of Environment**, v. 88, n. 1-2, p. 53–68, November 2003.

RAHMAN, H.; DEDIEU, G. Smac: a simplified method for the atmospheric correction of satellite measurements in the solar spectrum. **International Journal of Remote Sensing**, v. 15, n. 1, p. 123–143, 1994.

RAITER, F.; HOEGER, W.; SULI, G. S.; HAYASHI, M. M. S.; CAMPELO JÚNIOR, J. H.; NOGUEIRA, J. S.; PRIANTE FILHO, N.; VOURLITIS, G. L. Relação entre produção de liteira e radiação fotossinteticamente ativa refletida pelo dossel de ecótono floresta tropical úmida cerrado. In: I CONGRESSO DE ESTUDANTES E BOLSISTAS DO EXPERIMENTO LBA. Belém - PA, 2002.

REYCOSKY, D. C. Crop residue management: Soil, crop, climate interactions. In: CROP RESIDUE MANAGEMENT (J. L. Hatfield and B. A. Stewart Eds.). Boca Raton, FL: Lewis Publishers, 1994. p. 191–214.

RICHARDS, J. A. **Remote Sensing Digital Image Analysis: An Introduction**. Germany: Springer-Verlag, 1986. 281 p.

RYAN, R.; BALDRIDGE, B.; SCHOWENGERDT, R. A.; CHOI, T.; HELDER, D. L.; BLONSKI, S. Ikonos spatial resolution and image interpretability characterization. **Remote Sensing of Environment**, v. 88, n. 1-2, p. 37–52, November 2003.

SANCHES, L. S.; BIUDES, M. S.; PRIANTE FILHO, N.; MUNHOZ, K. C. A.; ALVES, A. O.; NOGUEIRA, J. S.; RAITER, F.; TRIERWEILER, J. L.; HOEGER, W.; VOURLITIS, G. L. A contribuição da queda e decomposição de liteira na respiração de uma floresta tropical de transição em Sinop/MT. In: VI CONGRESSO DE ECOLOGIA DO BRASIL. Fortaleza - CE, 2003.

SPACE IMAGING. **IKONOS Relative Spectral Response and Radiometric Calibration Coefficients**. [S.l.], Document Number SE-REF-016, Rev. A. April, 26 2001.

STEVEN, M. D.; MALTHUS, T. J.; BARET, F.; XU, H.; CHOPPING, M. J. Intercalibration of vegetation indices from different sensor systems. **Remote Sensing of Environment**, v. 88, n. 4, p. 412–422, December 2003.

SULI, G. S.; SILVEIRA, M.; YOSHITAKE, N. M.; PRIANTE FILHO, N.; VOURLITIS, G. L.; SANTOS, V. A.; KREMER, E. J. Proposta metodológica para avaliação estatística de biodiversidade arbórea de floresta de terra firme amazônica, Centro-Norte de Mato Grosso. In: VI CONGRESSO DE ECOLOGIA DO BRASIL. Fortaleza - CE, 2003.

TANRÉ, D.; DEROO, C.; DUHAUT, P.; HERMAN, M.; MORCRETTE, J. J.; PERBOS, J.; DESCHAMPS, P. Y. Description of a computer code to simulate the satellite signal in the solar spectrum: the 5S code. **International Journal of Remote Sensing**, v. 11, p. 659–668, 1990.

THENKABAIL, P. S.; HALL, J.; LIN, T.; ASHTON, M. S.; HARRIS, D.; ENCLONA, E. A. Detecting floristic structure and pattern across topographic and moisture gradients in a mixed species Central African forest using IKONOS and Landsat-7 ETM+ images. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 4, p. 255–270, 2003.

TOLEDO, L. O. **Aporte de Serrapilheira, Fauna Edáfica e Taxa de Decomposição em Áreas de Floresta Secundária no Município de Pinhal, RJ**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, fevereiro 2003.

VERMOTE, E. F.; TANRÉ, D.; DEUZE, J. L.; HERMAN, M.; MORCRETTE, J. J. Second simulation of the satellite signal in the solar spectrum, 6S: An overview. **IEEE Trans. Geosc. and Remote Sens.**, v. 35, n. 3, p. 675–686, July 1997.

WERNECK, M. S.; PEDRALLI, G.; GIESEKE, L. F. Produção de serrapilheira em três trechos de uma floresta semidecídua com diferentes graus de perturbação na Estação Ecológica do Tripuí, Ouro Preto, MG. **Revista Brasileira de Botânica**, v. 24, n. 2, p. 195–198, junho 2001.

WIEDER, R. K.; WRIGHT, S. J. Tropical forest litter dynamics and dry season irrigation on Barro Colorado Island, Panama. **Ecology**, v. 76, n. 6, p. 1971–1979, September 1995.



## APÊNDICE A – Programa LEGAL (Spring)

A seguir são descritos os comandos usados dentro do programa LEGAL do Spring que foram usados para realizar as transformações dos dados digitais (DN's) para radiância espectral, de radiância espectral para reflectância com correção atmosférica e geração de NDVI. Foram usadas apenas as faixas espectrais do vermelho (red) e do infravermelho próximo (nir).

### A.1 Radiância espectral 2000

Este programa converte os DN's da imagem de 2000 para radiância espectral.

```
// Conversão de DN para Radiância IKONOS 2000;
{
  Imagem nir, red ("Imagem_ikonos");
  Numerico redrad, nirrad("Ikonos_numerico");
  red = Recupere (Nome="red2000");
  nir = Recupere (Nome="nir2000");
  redrad = Novo (Nome="red2000_rad", ResX = 4, ResY = 4,
    Escala = 100000, Min = 0, Max = 500 );
  nirrad = Novo (Nome="nir2000_rad", ResX = 4, ResY = 4,
    Escala = 100000, Min = 0, Max = 500 );
  redcoef = 1.447387;
  nircoef = 1.127116;
  redrad=Digital(redcoef*red);
  nirrad=Digital(nircoef*nir);
}
```

## A.2 Radiância espectral 2001 e 2002

O programa a seguir faz a conversão dos DN's da imagem de 2001 para radiância espectral. Para o ano de 2002, basta alterar os nomes de entrada e de saída (ou seja, substituir 2001 por 2002).

```
// Conversão de DN para Radiância IKONOS 2001;
{
  Imagem nir, red ("Imagem_ikonos");
  Numerico redrad, nirrad ("Ikonos_numerico");
  red = Recupere (Nome="red2001");
  nir = Recupere (Nome="nir2001");
  redrad = Novo (Nome="red2001_rad", ResX = 4, ResY = 4,
    Escala = 100000, Min = 0, Max = 500 );
  nirrad = Novo (Nome="nir2001_rad", ResX = 4, ResY = 4,
    Escala = 100000, Min = 0, Max = 500 );
  redcoef = 1.277107;
  nircoef = 0.998303;
  redrad=Digital(redcoef*red);
  nirrad=Digital(nircoef*nir);
}
```

## A.3 Reflectâncias com correção atmosférica

O programa a seguir faz a correção atmosférica a partir dos valores de radiância previamente gerados. Os coeficientes de correção são para os cenários reais.

```
//Programa para correção atmosférica usando coeficientes do
Msixs/Linux;
//Red e Nir. 3 anos (2000, 2001 e 2002). Satélite IKONOS;
//Cálculo de Reflectância usando cenário real;
{
  Numerico red2000, red2001, red2002, nir2000, nir2001,
  nir2002("Ikonos_numerico");
  Numerico redreflec2000, redreflec2001, redreflec2002
```

```

        ("Ikonos_numerico");
Numerico  nirreflec2000, nirreflec2001, nirreflec2002
        ("Ikonos_numerico");
Imagem imgred2000, imgred2001, imgred2002 ("Imagem_ikonos");
Imagem imgnir2000, imgnir2001, imgnir2002 ("Imagem_ikonos");
red2000 = Recuperar (Nome="red2000_rad");
red2001 = Recuperar (Nome="red2001_rad");
red2002 = Recuperar (Nome="red2002_rad");
nir2000 = Recuperar (Nome="nir2000_rad");
nir2001 = Recuperar (Nome="nir2001_rad");
nir2002 = Recuperar (Nome="nir2002_rad");

//Ano de 2000;
red00xa= 0.00301;
red00xb= 0.01986;
red00xc= 0.05149;
nir00xa = 0.00432;
nir00xb = 0.01000;
nir00xc = 0.02987;

//Ano de 2001;
red01xa = 0.00319;
red01xb = 0.02917;
red01xc = 0.05772;
nir01xa = 0.00457;
nir01xb = 0.01558;
nir01xc = 0.03563;

//Ano de 2002;
red02xa = 0.00326;
red02xb = 0.02338;
red02xc = 0.06046;
nir02xa = 0.00467;
nir02xb = 0.01214;
nir02xc = 0.03815;

```

```

//Cálculo da Reflectância;
redreflec2000 = Novo(Nome="red2000_acr", ResX = 4,
    ResY = 4, Escala=100000 , Min = 0, Max = 100 );
redreflec2001 = Novo(Nome="red2001_acr", ResX = 4,
    ResY = 4, Escala=100000 , Min = 0, Max = 100 );
redreflec2002 = Novo(Nome="red2002_acr", ResX = 4,
    ResY = 4, Escala=100000 , Min = 0, Max = 100 );
nirreflec2000 = Novo(Nome="nir2000_acr", ResX = 4,
    ResY = 4, Escala=100000 , Min = 0, Max = 100 );
nirreflec2001 = Novo(Nome="nir2001_acr", ResX = 4,
    ResY = 4, Escala=100000 , Min = 0, Max = 100 );
nirreflec2002 = Novo(Nome="nir2002_acr", ResX = 4,
    ResY = 4, Escala=100000 , Min = 0, Max = 100 );

redreflec2000=(100*((red00xa*red2000-red00xb)/
    (1+red00xc*(red00xa*red2000-red00xb))));
redreflec2001=(100*((red01xa*red2001-red01xb)/
    (1+red01xc*(red01xa*red2001-red01xb))));
redreflec2002=(100*((red02xa*red2002-red02xb)/
    (1+red02xc*(red02xa*red2002-red02xb))));
nirreflec2000=(100*((nir00xa*nir2000-nir00xb)/
    (1+nir00xc*(nir00xa*nir2000-nir00xb))));
nirreflec2001=(100*((nir01xa*nir2001-nir01xb)/
    (1+nir01xc*(nir01xa*nir2001-nir01xb))));
nirreflec2002=(100*((nir02xa*nir2002-nir02xb)/
    (1+nir02xc*(nir02xa*nir2002-nir02xb))));

//Geração de reflectância imagem;
imgred2000 = Novo(Nome="red2000_acr", ResX = 4,
    ResY = 4 );
imgred2001 = Novo(Nome="red2001_acr", ResX = 4,
    ResY = 4 );
imgred2002 = Novo(Nome="red2002_acr", ResX = 4,
    ResY = 4 );

```

```

imgred2000 = Imagem(redreflec2000);
imgred2001 = Imagem(redreflec2001);
imgred2002 = Imagem(redreflec2002);
imgnir2000 = Novo(Nome="nir2000_acr", ResX = 4,
    ResY = 4);
imgnir2001 = Novo(Nome="nir2001_acr", ResX = 4,
    ResY = 4);
imgnir2002 = Novo(Nome="nir2002_acr", ResX = 4,
    ResY = 4);
imgnir2000 = Imagem(nirreflec2000);
imgnir2001 = Imagem(nirreflec2001);
imgnir2002 = Imagem(nirreflec2002);
}

```

## A.4 Geração de NDVI

A seguir são listados os comandos para geração de NDVI categoria numérico e imagem.

```

//Calculo do NDVI com correção atmosférica;
//Satélite IKONOS. Anos 2000, 2001 e 2002;
{
Imagem ndvi2000img, ndvi2001img, ndvi2002img ("Imagem_ikonos");
Numerico red2000, nir2000, ndvi2000 ("Ikonos_numerico");
Numerico red2001, nir2001, ndvi2001 ("Ikonos_numerico");
Numerico red2002, nir2002, ndvi2002 ("Ikonos_numerico");
red2000= Recuperar (Nome = "red2000_acr" );
nir2000 = Recuperar (Nome = "nir2000_acr" );
red2001= Recuperar (Nome = "red2001_acr" );
nir2001 = Recuperar (Nome = "nir2001_acr" );
red2002= Recuperar (Nome = "red2002_acr" );
nir2002 = Recuperar (Nome = "nir2002_acr" );

//Geração de NDVI numérico (-1 a +1);
ndvi2000 = Novo (Nome="NDVI_2000", ResX = 4, ResY = 4,
    Escala = 100000, Min = -1, Max = 1 );

```

```

ndvi2000 = (( nir2000 - red2000 )/( nir2000 + red2000 )) ;
ndvi2001 = Novo (Nome="NDVI_2001", ResX = 4, ResY = 4,
    Escala = 100000, Min = -1, Max = 1 );
ndvi2001 = (( nir2001 - red2001 )/( nir2001 + red2001 )) ;
ndvi2002 = Novo (Nome="NDVI_2002", ResX = 4, ResY = 4,
    Escala = 100000, Min = -1, Max = 1 );
ndvi2002 = (( nir2002 - red2002 )/( nir2002 + red2002 )) ;

//Geração de Imagem NDVI normalizado (0 - 255);
ndvi2000img = Novo(Nome="NDVI_2000_acr", ResX = 4,
    ResY = 4);
ndvi2000img = Imagem (ndvi2000*127 +128);
ndvi2001img = Novo(Nome="NDVI_2001_acr", ResX = 4,
    ResY = 4);
ndvi2001img = Imagem (ndvi2001*127 +128);
ndvi2002img = Novo(Nome="NDVI_2002_acr", ResX = 4,
    ResY = 4);
ndvi2002img = Imagem (ndvi2002*127 +128);
}

```