

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FÍSICA E
MEIO AMBIENTE**

George Sanches Suli

**Comparações empíricas entre medições multiespectrais de
sistemas sensores e índice de área foliar verde em floresta
amazônica de transição**

Prof. Dr. Peter Zeilhofer
Orientador

Cuiabá, dezembro de 2004.

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FÍSICA E
MEIO AMBIENTE**

George Sanches Suli

**Comparações empíricas entre medições multiespectrais de
sistemas sensores e índice de área foliar verde em floresta
amazônica de transição**

*Dissertação submetida à
Universidade Federal de
Mato Grosso como parte dos
requisitos para obtenção do
título de Mestre em Física e
Meio Ambiente.*

Prof. Dr. Peter Zeilhofer
Orientador

Cuiabá, dezembro de 2004.

Agradecimentos

Ao Me. Mauro Massao Shiota Hayashi (In Memoriam) pela amizade, seu companheirismo, apoio, disposição e experiência na montagem de equipamentos e seus programas.

Ao Prof. Dr. Peter Zeilhofer por compartilhar seu grande conhecimento, pela orientação firme, e sempre disposta, amizade, incentivo e dedicação.

A Prof.^a Dra. Luciana Sanches, pelo seu generoso apoio, importantes sugestões, amor, dedicação à pesquisa, e valioso auxílio na elaboração do texto.

Ao Prof. Dr. José de Souza Nogueira, pela amizade, apoio e incentivos constantes.

Ao Prof. Dr. Nicolau Priante Filho, co-responsável pela realização desse trabalho, por sua amizade e apoio.

À minha família, pelo apoio em todos os momentos.

Ao Prof. Dr. George Louis Vourlitis por seu incentivo desde o início desse trabalho e presença constante, apesar da distância.

Ao colega mestrando Sergio Gripp pelo auxílio nas análises e por suas sugestões.

Ao colega e bolsista Rodrigo Marques pelo auxílio nas análises e por sua importante participação na coleta de dados e correção atmosférica das imagens.

Ao Prof. Dr. José Holanda Campelo Júnior pela introdução à Climatologia e aos modernos métodos de avaliação estatística de modelos.

Ao Prof. Dr. Sérgio Roberto de Paulo, pelas aulas de teoria da complexidade.

Sumário

LISTA DE FIGURAS	i
LISTA DE TABELAS.....	iii
LISTA DE QUADROS	iv
LISTA DE SIGLAS.....	v
RESUMO	vii
ABSTRACT	viii
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1 CONCEITOS E TERMOS BÁSICOS DE SENSORIAMENTO REMOTO	3
2.1.1 Breve Introdução ao Sensoriamento Remoto	3
2.1.2 Pré-processamento - Erros Associados à Interpretação de Imagens de Satélite	5
2.2 SISTEMAS SENSORES	6
2.2.1 IKONOS	6
2.2.2 LANDSAT 7 TM+.....	7
2.2.3 CBERS	10
2.3 RADIAÇÃO NA FOLHA VEGETAL VERDE, ÍNDICES DE VEGETAÇÃO E ÁREA FOLIAR	12
2.3.1 Propriedades reflexivas da folha vegetal verde.....	12
2.3.2 propriedades físico-fisiológicas da folha vegetal verde	13
2.3.3 Índices espectrais de vegetação	14
2.3.4 Índice de Área Foliar - IAF.....	15
2.3.5 Fotografias Hemisféricas	16
2.3.6 Medições Destrutivas com o Abate e Contagem Direta das Folhas	17
2.4 MAPEAMENTO DE ÁREA FOLIAR	18
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	20
3.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	20
3.1.1 Localização Geográfica	20
3.1.2 Caracterização Geo-ecológica	21
3.1.3 Caracterização Climatológica	24
3.2 MATERIAIS UTILIZADOS	27
3.2.1 Imagens de Satélite	27
3.2.2 Equipamentos Utilizados	27
3.3 MÉTODOS	30
3.3.1 Georreferenciamento	30
3.3.2 Calibração Radiométrica	30
3.3.3 Transformação de Valores Digitais.....	30
3.3.4 Correção Atmosférica	30
3.3.5 Disposição dos Pontos de Tomadas de Fotos Hemisféricas	33
3.3.6 Procedimento para a tomada de fotografias	39
3.3.7 Procedimentos Utilizados nas Transformações para a correlação entre IAF e NDVI ..	39
3.3.8 Tratamento Estatístico	40
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	43
4.1 ESTIMATIVA DO ÍNDICE DE ÁREA FOLIAR	43
4.2 ESTIMATIVA DO NDVI	47
4.2.1 Variação Temporal da Radiação Fotossinteticamente Ativa Refletida.....	47
4.2.2 Cálculo e resultados do NDVI.....	48

4.3 CORRELAÇÃO ENTRE IAF E NDVI	49
4.4 DINÂMICA DO MANEJO SELETIVO	55
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	57
BIBLIOGRAFIA.....	60
ANEXO 1	67
<i>PROCEDIMENTOS PARA CORREÇÃO ATMOSFÉRICA DE IMAGENS DOS SATÉLITES</i> <i>IKONOS E LANDSAT TM+</i>	67
ANEXO 2	73
<i>FOTOGRAFIAS HEMISFÉRICAS</i>	73
ANEXO 3	75
<i>ÍNDICES ESPECTRAIS DE VEGETAÇÃO.....</i>	75

Lista de Figuras

Figura 1 – Resposta espectral relativa pancromática e multiespectral do sensor IKONOS..	7
Figura 2 - Resposta espectral nas bandas 1, 2, 3, 4, 5 e 7 do sistema ETM+.	8
Figura 3 – Interação da reflectância em folha vegetal, segundo a classe de radiação.	12
Figura 4 – Faixa de absorbância dos principais pigmentos e sua relação com a taxa de atividade fotossintética ao longo do espectro visível.	13
Figura 5 – Variação da reflectância em cobertura vegetal, segundo a disponibilidade de água.	14
Figura 6 – Fotografia hemisférica em um ponto da área de estudo (à esquerda) e sua correspondente classificação (à direita).	17
Figura 7 – Localização da área de estudo.	20
Figura 8 – Posição do “arco do desflorestamento” e área de estudos.	21
Figura 9 – Eco-regiões do Estado de Mato Grosso.	23
Figura 10 – Aspecto da região de estudos em 23/08/2003. As árvores floridas são da espécie <i>Qualea paraensis</i> .	23
Figura 11 – Distribuição de espécies arbóreas por família.	24
Figura 12 – Distribuição de indivíduos amostrados por família.	24
Figura 13 – Sensitividade espectral relativa do sensor e resposta espectral à radiação PAR ideal.	28
Figura 14 – Torre-suporte e alguns instrumentos de coleta de dados micro climáticos do sítio de estudos da fazenda Maracaí.	29
Figura 15 – Pares de imagens IKONOS, em série temporal de 2000, 2001 e 2002 (de cima para baixo), com valores de reflectância, em composição RGB, nas bandas 1, 2 e 3, corrigidas (à direita) e sem correção atmosférica (à esquerda).	32
Figura 16 – Composição RGB das bandas 3, 4 e 5 Landsat 7ETM+, ao centro, locação da amostragem de fotografias hemisféricas (retângulo vermelho), e a via de acesso (estrada vicinal/trilha em amarelo), que parte da rodovia BR-163 a partir do entroncamento com a MT-423.	33
Figura 17 – Composição RGB das bandas 3, 4 e 5, Landsat 7ETM+ de 18/06/2000, ao centro, sobreposição de uma imagem IKONOS (19/05/2001), RGB, bandas 1,2 e 3. Resolução espacial: Landsat 29,5 m; IKONOS 4 m.	34
Figura 18 – Imagem IKONOS (19/05/2001), RGB, bandas 1, 2 e 3. Ao centro, locação do <i>grid</i> de amostragem. Imagem sobre RGB das bandas 3, 4 e 5, Landsat 7ETM+ de 18/06/2000.	35

Figura 19 – Posições para tomada de fotografias hemisféricas nos pontos identificados. Medidas em metros.	36
Figura 20 – Arranjo para tomada de fotografias hemisféricas (pontos unidos por linhas em vermelho distanciadas de 40 m), no transecto de amostragem botânica e pontos de coleta de liteira (pontos esparsos em verde). Imagem superior com resolução de 1 m (IKONOS pan) e inferior com resolução de 4 m (IKONOS RGB).	37
Figura 21 – Arranjo para tomada de fotografias hemisféricas nos pontos de coleta de liteira no sítio de estudo. Imagem superior com resolução de 1 m (IKONOS pan) e inferior com resolução de 4 m (IKONOS RGB).	38
Figura 22 – Histograma da distribuição de valores de IAF nas posições de coleta de liteira no sítio de estudo.	43
Figura 23 – Variação temporal da PARr na torre meteorológica e na árvore suporte <i>Bertholetia excelsa</i>	47
Figura 24 – IPVI das imagens IKONOS em 2000, 2001 e 2002.	48
Figura 25 – Correlação entre IPVI (imagem IKONOS de 2002) e Índice de Área Foliar. .	52
Figura 26 – Correlação entre IAF e NDVI corrigido (imagem Landsat de 2000).	53
Figura 27 – Diferença entre imagens IPVI. (a) Diferenças entre 2001-2000, (b) Diferenças entre 2002-2001, (c) Diferenças entre 2002-2000. Em azul estão indicadas a área de estudos e a posição da torre de coleta de dados.	56
Figura 28 - variação da espessura ótica em função da visibilidade.	71

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Precipitação para a área em estudo.....	26
Tabela 2 - Umidade relativa do ar para a área em estudo.....	26
Tabela 3 - Temperatura média do ar para a área em estudo.	27
Tabela 4 – Valores de área foliar nos pontos de coleta de liteira, calculados pelo software GLA, em 60° (LAI 4 <i>ring</i>) e 75° (LAI 5 <i>ring</i>).	45
Tabela 5 – Valores de área foliar nos pontos do arranjo de amostragem calculados pelo software GLA, em 60° (LAI 4 <i>ring</i>) e 75° (LAI 5 <i>ring</i>).	46
Tabela 6 – Valores de NDVI e IPVI para os pontos amostrados.	49
Tabela 7 – Resultados da regressão entre fotografias hemisféricas e valores médios de IPVI.....	51
Tabela 8 – Resultados da regressão entre fotografias hemisféricas e valores médios de IPVI, NDVI e NDVI corrigido, obtidos de imagem LANDSAT.	53
Tabela 9 – Valores de IAF, IPVI e a sua média por reamostragem aleatória com reposição nos pontos de liteira e torre secundária.....	54

Lista de Quadros

Quadro 1 - Características espectrais e espaciais do sensor MODIS.	9
Quadro 2 – Características do Imageador de Amplo Campo de Visada WFI.	10
Quadro 3 – Características da câmera de alta resolução CCD.	11
Quadro 4 – Característica dos Imageador por Varredura de Média Resolução IRMSS.....	11
Quadro 5 – Imagens de satélite utilizadas no presente estudo.....	27
Quadro 6 – Características espectrais do sensor IKONOS.....	67
Quadro 7 – IKONOS - coeficientes de calibração para produtos com 11 bits.	68
Quadro 8 – Valores de irradiação solar no topo da atmosfera (em $\text{W m}^{-2} \mu\text{m}^{-1}$) para os sistemas sensores IKONOS e Landsat 7.....	70

Lista de Siglas

ARVI - *Atmospherically Resistant Vegetation Index* (índice de vegetação resistente ao efeito da atmosfera).

ATREM - *Atmosphere removal program* (programa de remoção de efeitos atmosféricos).

AVHRR - *Advanced Very High Resolution Radiometer* (radiômetro de alta resolução avançado)

BRDF - *Bidirectional Reflectance Distribution Function* (função de distribuição da refletância bidirecional)

BRF - *Bidirectional Reflectance Function* (função de refletância bidirecional)

CBERS - *China-Brazil Earth Resources Satellite* (Satélite sino-brasileiro de recursos terrestres)

DN - *Digital Numbers* (números digitais)

DVI - *Difference Vegetation Index* (índice de vegetação de diferença)

EOS - *Earth Observing System* (sistema de observação terrestre)

ETM - *Enhanced Thematic Mapper* (mapeador temático aperfeiçoado)

EVI - *Enhanced Vegetation Index* (índice de vegetação aperfeiçoado)

GEMI - *Global Environmental Monitoring Index* (índice de monitoramento ambiental)

IAF - Índice de Área Foliar

IFOV - *Instantaneous Field Of View* (campo de vista instantâneo)

IPVI - *Infrared Percentage Vegetation Index* (índice de vegetação da porcentagem do infravermelho)

IR - *Infra-Red* (infravermelho)

LAI - *Leaf Area Index* (índice de área foliar)

MODIS = *MODerated Resolution Imaging Spectroradiometer* (espectroradiômetro imageador de resolução moderada)

MSAVI - *Modified Soil Adjusted Vegetation Index* (índice de vegetação ajustado para os efeitos do solo modificado)

MSAVI2 - *Second Modified Soil Adjusted Vegetation Index* (segundo índice de vegetação ajustado para os efeitos do solo modificado)

MSS - *Multispectral Scanner System* (sistema escaner multiespectral)

NASA - *National Spacial Agence* (agencia especial americana)

NDVI - *Normalized Difference Vegetation Index* (índice de vegetação da diferença normalizada)

NIR - *Near Infra-Red* (infravermelho próximo)

NOAA - *National Oceanic and Atmospheric Admin.* (administração oceânica e atmosférica americana)

FAPAR - *Fraction of Absorbed Photossynthetically Active Radiation* (fração da radiação fotossinteticamente ativa absorvida)

PARi - *Photossynthetically Active Radiation incident* (radiação fotossinteticamente ativa incidente)

PARr - *Photossynthetically Active Radiation reflected* (radiação fotossinteticamente ativa refletida)

PVI - *Perpendicular Vegetation Index* (índice de vegetação perpendicular)

RVI - *Ratio Vegetation Index* (índice de vegetação da razão)

SAR - *Synthetic Aperture Radar* (radar de abertura artificial)

SAVI - *Soil Adjusted Vegetation Index* (índice de vegetação ajustado ao solo)

SR - *Simple Ratio* (razão simples)

SVI - *Spectral Vegetation Index* (índice de vegetação spectral)

TM - *Thematic Mapper* (mapeador temático)

TSAVI - *Transformed Soil Adjusted Vegetation Index* (índice de vegetação ajustado ao solo transformado)

WDVI - *Weighted Difference Vegetation Index* (índice de vegetação da diferença balanceado)

WRS - *Worldwide Reference System* (sistema de referência mundial)

Resumo

Suli, G. S. **Comparações empíricas entre medições multiespectrais de sistemas sensores e índice de área foliar verde em floresta amazônica de transição.** Cuiabá, 2004, 90 p. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Ciências Exatas e da Terra, Universidade Federal de Mato Grosso.

Este trabalho aplica imagens multiespectrais e fotografias hemisféricas de uma floresta seca de transição amazônica para: (a) estimar o Índice de Área Foliar por meio de fotografias hemisféricas; (b) estimar valores de NDVI (ou IPVI correspondente) por meio de imagens de satélite IKONOS e LANDSAT ETM+; (c) verificar a correlação entre Índice de Área Foliar e o NDVI, no período de transição úmido-seco; (d) mostrar a dinâmica do manejo seletivo entre 2000, 2001 e 2002 por meio de imagens de satélite IKONOS. Para estudos de correlação com índices espectrais de vegetação, como o NDVI, os valores de área foliar foram estimados pela análise de fotografias hemisféricas. Esses valores foram associados por meio de correlação de Pearson a valores de NDVI (ou IPVI) obtidos pelos sensores IKONOS e LANDSAT ETM+. Alguns aspectos da análise usando essas imagens são abordados, como a importância da correção atmosférica, o uso de diferença entre imagens para a avaliação da variação temporal desses índices e a validação a partir de métodos estatísticos para a avaliação do modelo. A falta de correlação significativa entre os dados obtidos revela a importância da correlação temporal entre dados comparados, provavelmente devido à sazonalidade e heterogeneidade de espécies na floresta seca de transição. São apresentadas algumas sugestões para a realização de estudos futuros.

Palavras-chave: Índice de Área Foliar, IAF, IKONOS, IPVI, LAI, LANDSAT, NDVI.

Abstract

Suli, G. S. **Empiric comparisons between multispectral measures and leaf area index in an Amazonian transitional dry forest**. Cuiabá, 2004, 90 p. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Ciências Exatas e da Terra, Universidade Federal de Mato Grosso.

This work deals with the leaf area index (LAI) evaluation through remote sensing techniques in an Amazonian transitional dry forest site. The objective are: (a) estimate the LAI through hemispherical photography ground measurements; (b) estimate NDVI (or corresponding IPVI) values through sensor IKONOS high spatial resolution and LANDSAT ETM+ images; (c) show a relationship, if true, between NDVI (or IPVI) and LAI, in a transitional dry-wet season; (d) show the dynamics of selective logging in the area of study between 2000, 2001 and 2003, by IKONOS imagery. The LAI values were obtained from hemispheric photography, and correlated by Pearson, to NDVI, IPVI, and NDVI_c values, obtained from IKONOS and LANDSAT ETM+. Some aspects, like atmospheric correction of images, difference between images to measure the temporal variation of vegetation indices, and statistic treatment were considered. The lack of a significant correlation reveals the importance of the temporal synchronization between data, probably due seasonality and heterogeneity of species in Amazonian transitional dry forest. Some instructions and suggests are offer to future studies.

Palavras-chave: Leaf Area Index, IAF, IKONOS, IPVI, LAI, LANDSAT, NDVI.

1. INTRODUÇÃO

Entre os processos e técnicas que permitem um maior conhecimento dos ciclos biofísicos aos quais o planeta está submetido, e onde as características da cobertura vegetal são de grande importância para o estudo do particionamento energético, o uso do sensoriamento remoto possibilita a caracterização de grandes áreas em função das propriedades reflexivas da superfície terrestre.

Assim como a determinação de certos índices influenciados pelas propriedades referentes à sua reflectância (índices espectrais de vegetação, como o NDVI - Normalized Difference Vegetation Index, e os índices estruturais florestais, como o IAF - Índice de Área Foliar). O índice de área foliar, por exemplo, pode ser relacionado à radiação fotossinteticamente ativa absorvida. Vários grupos de pesquisa estão hoje abordando o problema da quantificação da área foliar através do sensoriamento remoto em diversas regiões do mundo. É um trabalho desafiador pois o problema não é simples e apresenta dificuldades na realização da metodologia. Essas dificuldades se relacionam ao campo de estudo, formado por regiões parcialmente exploradas ou virgens de floresta tropical muitas vezes de difícil acesso e condições de trabalho penosas. A metodologia é constituída pela coleta de dados em campo, seu relacionamento com os parâmetros espectrais medidos através de sensoriamento remoto, remoção até nível satisfatório ou determinado das variáveis indutoras de erro (como o georreferenciamento e a influência da atmosfera), e validação dos resultados através de inter-comparações entre os valores preditos e os observados. O estudo ora apresentado toma por base os trabalhos da equipe de TIAN et al. (2002), na África do Sul e adaptou, segundo as possibilidades de execução, os aspectos referentes à aquisição e ao tratamento dispensado aos dados obtidos. Os objetivos do presente trabalho foram:

Estimar o Índice de Área Foliar por meio de fotografias hemisféricas; estimar valores de NDVI por meio de imagens de satélite IKONOS e Landsat; verificar a

correlação entre Índice de Área Foliar e o NDVI, no período de transição úmido seco; verificar a dinâmica do manejo seletivo entre 2000, 2001 e 2002 por meio de imagens de satélite IKONOS.

Espera-se que a correlação dos índices possibilite a produção de um mapa de área foliar. A metodologia difere daquela utilizada por TIAN et al. (2002) desde a tomada dos dados de área foliar *in loco* (com o uso de fotografias hemisféricas) até o tipo de vegetação amostrada. O presente estudo é baseado em dados e imagens disponibilizadas pelo programa LBA (Large Scale Biosphere-Atmosphere Experiment in Amazonia). Não houve fundos destinados à aquisição de equipamentos ou imagens de satélite. O programa é liderado pelo Brasil e tem por finalidade a qualificação de pessoal e quantificação de fenômenos atmosféricos e modelagem climática através da reunião de especialistas de vários países.

Os estudos foram realizados no Município de Cláudia, na Fazenda Continental, de propriedade da Madeireira Maracaí, em uma floresta seca de transição amazônica. Esse tipo florestal se desenvolve devido a uma estação seca prolongada em comparação com outras formações florestais amazônicas. O fator climático-edáfico influi na densidade de árvores e na biodiversidade (TER STEEGE et al., *in press*). A importância principal deste trabalho reside no fato de existirem poucos estudos nesse tipo florestal, que apresenta uma das maiores taxas de desmatamento do Brasil, e na potencial aplicação de seus resultados em posteriores associações com estudos locais referentes a balanço de energia ou associação de área foliar com índices físicos naquela assinatura vegetal específica. O banco de dados sobre área foliar obtido pode ser comparado aos mapas de grande cobertura existentes para avaliação de sua precisão.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 CONCEITOS E TERMOS BÁSICOS DE SENSORIAMENTO REMOTO

2.1.1 Breve Introdução ao Sensoriamento Remoto

Neste capítulo serão apresentados e descritos os sensores que foram utilizados e/ou apresentam potencial para a geração de mapas de área foliar sobre as zonas florestais estudadas. Também serão descritos os fundamentos e conceitos de alguns procedimentos comuns em sensoriamento remoto para se reduzir ou eliminar algumas distorções devidas à geometria terrestre (ortorretificação), posicionamento do tema sob as coordenadas terrestres (georreferenciamento) e eliminação do efeito da atmosfera (correção atmosférica).

Sensores remotos são aparelhos de qualquer natureza sensíveis à distância a alguma propriedade emissiva ou reflexiva do elemento em estudo. Os sistemas sensores são equipamentos capazes de coletar energia proveniente do objeto, convertê-la em sinal passível de ser registrado e apresentá-lo em forma adequada à extração de informações (NOVO, 1992). Uma imagem de sensoriamento remoto é multidimensional: horizontal, vertical e, muitas vezes, multiespectral, o que permite, sob o ponto de vista da ecologia da paisagem, estudar diferentes aspectos dos ecossistemas (FORMAN & GODRON, 1986), fornecendo meios para estimar as propriedades da vegetação tais como a cobertura vegetal verde (f_c - fractional green vegetation cover) e o índice de área de foliar verde (GLAI - Green Leaf Area Index) (QI et al., 2000). A verificação da estrutura do dossel (por exemplo, Índice de Área Foliar) e características biofísicas (por exemplo, f_{APAR}) por meio dos modelos simulados de inversões de função de distribuição de refletância bidirecional (BRDF) representa um dos maiores passos no sensoriamento remoto da vegetação terrestre,

com subseqüentes benefícios para biosfera-atmosfera e o avanço da modelagem de biogeoquímica (ASNER et al., 1998a).

Sensores extraterrestres a bordo de satélites são do tipo digital, ou seja, emitem sinais que são codificados em valores binários (0 e 1) de modo que uma estação de recepção digital é capaz de recebê-los. Aqui, foram utilizados produtos obtidos por sensoriamento remoto digital extraterrestre (imagens de satélite) e produtos obtidos por sensores localizados ao nível do solo (sensores de radiação fotossinteticamente ativa, fotografias digitais hemisféricas). Esses sensores utilizados têm em comum a sensibilidade às ondas eletromagnéticas situadas entre 400 e 700 nm (zona do espectro visível), no caso dos sensores ditos terrestres, como o sensor PAR LITE. Os sensores a bordo de satélites artificiais, como os sensores IKONOS, Landsat TM+ e MODIS têm seu desempenho avaliado pela análise de quatro parâmetros de sensibilidade:

Resolução Espacial

Refere-se à área terrestre coberta pelo pixel da imagem, maiores resoluções produzem píxels que se referem as menores áreas. A imagem também é computacionalmente maior (pois possui um maior número de píxels) quando apresenta maior resolução se comparada a outra que abranja a mesma área.

Resolução Temporal

É o espaço de tempo decorrido entre uma passagem e outra sobre o mesmo ponto por um sistema sensor. Sensores que tem maior intervalo temporal apresentam sua órbita em alturas maiores.

Resolução Radiométrica

Refere-se à capacidade do sensor de discretizar valores para um pixel, ou seja é o número de valores possíveis que um pixel pode assumir. As resoluções radiométricas mais comuns são de 8 bits ($2^8 = 256$ valores possíveis) e de 11 bits ($2^{11} = 1024$ valores possíveis).

Resolução Espectral

Refere-se ao número de sensores que um sistema possui que discretizam o espectro em regiões chamadas bandas. O sistema é dito de maior resolução espectral quando é composto por mais sensores sensíveis a menores intervalos de comprimentos de onda do espectro magnético. Assim, comparativamente, os

sensores IKONOS, Landsat e MODIS podem ser dispostos em ordem crescente de resolução espectral, uma vez que possuem 5 (azul, verde, vermelho e infravermelho próximo e pancromático), 8 (7 bandas multi-espectrais e 1 banda pancromática), e 36 bandas, respectivamente.

2.1.2 Pré-processamento - Erros Associados à Interpretação de Imagens de Satélite

Georreferenciamento

Georreferenciamento trata das técnicas utilizadas para combinar a informação digital fornecida pela imagem de sensoriamento remoto à posição real dos objetos e situações ao pixel que se pretende retratá-la. A diferença no posicionamento dos pixels sobre a coordenada geográfica respectiva chama-se erro.

Ortorretificação

Ortorretificação consiste na remoção do erro devido à distorção da imagem que retrata uma superfície curva (a Terra) aliado à distorção devido à representação retangular regular de pontos que possuem distâncias diferentes entre si e o sensor de aquisição.

Correção Radiométrica

A correção radiométrica é uma coleção de correções de diferentes erros de origem eletrônica, como diferença de leitura ou transferência de taxas entre sensores, que podem produzir, por exemplo, listras na imagem.

Correção Atmosférica

A estimativa das propriedades da vegetação com sensoriamento remoto vem sendo bem sucedida. Entretanto, grandes esforços são necessários para as correções atmosférica e bidirecional. Embora os procedimentos para corrigir estes efeitos estejam disponíveis, os dados subordinados sobre condições atmosféricas e propriedades de distribuição bidirecional da radiação dos tipos da superfície são limitados no espaço e no tempo (QI et al., 2000).

A correção atmosférica é de grande importância quando se pretende comparar dados coletados no solo com aqueles coletados por sensores remotos a bordo de satélites. Isso ocorre porque o sinal obtido pelo satélite é alterado pela ação das

propriedades físicas da atmosfera. Esta ação é bastante significativa no espectro visível, de forma que, para estudos que levem em consideração índices de vegetação, que trabalham com a banda do vermelho, a correção atmosférica é imprescindível. A radiação eletromagnética interage com as partículas suspensas e com moléculas constituintes de gases, ocasionando um processo de espalhamento e de absorção da radiação eletromagnética e resultando numa redução do contraste das imagens (CUNHA, 2003).

Alguns algoritmos para correção atmosférica pelo método radiativo (que leva em consideração aspectos e índices das propriedades da atmosfera) são disponibilizados pela Internet, como o software ATREM (GAO et al., 1999) (que não é atualmente distribuído gratuitamente, nem suportado), e o algoritmo 6S – “Second simulation of the satellite signal in the solar spectrum” (VERMOTE et al., 1997). O ATREM considera as variações espaciais e temporais do vapor d’água, com base nas feições de 0,94 μm e 1,14 μm (GAO et al., 1993).

Foi escolhida a correção através do software IDRISI, que se utiliza de um algoritmo que leva em consideração a correção radiativa. O software IDRISI, desenvolvido pelo departamento de Geografia da Clark University, nos USA, é um sistema híbrido de processamento de imagens e sistema de informações geográficas. Dentre os softwares desta natureza, destaca-se pela facilidade de instalação, pois trabalha em ambiente Windows e conjuga processamento digital de imagens, análise multitemporal, análise geográfica, modelagem digital do terreno e interação com bancos de dados (NOGUEIRA et al., 1997).

2.2 SISTEMAS SENSORES

2.2.1 IKONOS

O sistema IKONOS carrega sensores que trabalham nas bandas pancromática, azul, verde, vermelho e infravermelho próximo, como mostrado na figura 1, com as resoluções espaciais de 1 m (pancromático) e 4 m (multispectral). O programa LBA adquiriu algumas imagens de sítios de estudo em que estão localizadas torres micro meteorológicas do programa e de sítios de coletas de dados ou que são palco de

estudos. As imagens IKONOS adquiridas pelo programa LBA, têm sido utilizadas em larga faixa de aplicações (HURTT et al., 2003). Entretanto, uma das limitações para o seu uso em comparações de índices medidos no solo, é a dificuldade de correção atmosférica pela indisponibilidade ou inexistência de dados, como, por exemplo, de visibilidade. No anexo A são descritos os procedimentos utilizados para a correção atmosférica, de algumas imagens, com o uso dos programas IDRISI e MSIXS (a partir de MARQUES et al., *in press*).

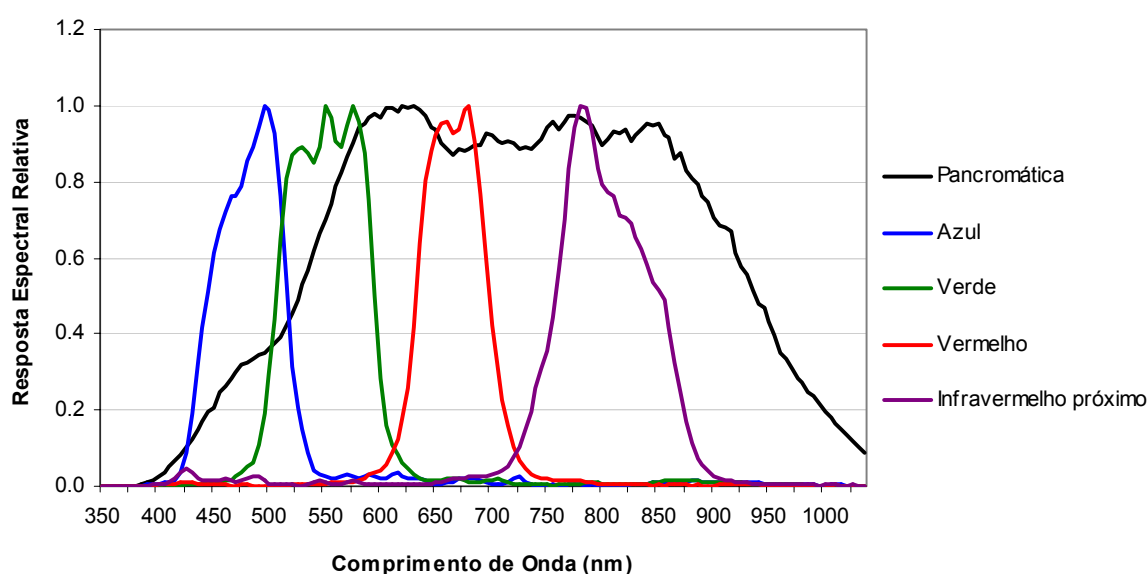


Figura 1 – Resposta espectral relativa pancromática e multiespectral do sensor IKONOS.

Adaptado do documento SE-REF-016 – Rev. A – SPACE IMAGINGTM.

2.2.2 LANDSAT 7 TM+

O sistema sensor LANDSAT 7 entrou em operação em 15/04/1999, composto por 6 bandas de interesse para a composição de índices de vegetação. Possui uma resolução espacial de 30 m para as bandas 1, 2, 3, 4, 5 e 7 (multiespectrais), figura 2. Embora esse sistema já esteja desativado, devido a problemas técnicos no satélite, foi certamente um dos sistemas mais utilizados e populares. É aqui descrito de forma breve devido ao grande número de artigos que o levaram em consideração para o cálculo de índices de vegetação.

Uma imagem Landsat7 ETM+ completa é composta por 8 bandas espectrais incluindo uma banda pancromática e a banda termal. Entre as principais melhorias técnicas se comparado ao seu antecessor, o satélite Landsat TM, destacam-se a adição de uma banda espectral (banda 8, pancromática) com resolução de 15 m, registrada com as demais bandas, melhorias nas características geométricas e radiométricas, e o aumento da resolução espacial da banda termal para 60 m. Esses avanços tecnológicos qualificam o Landsat7 como um satélite adequado para a geração de imagens com aplicações diretas até a escala 1:25.000.

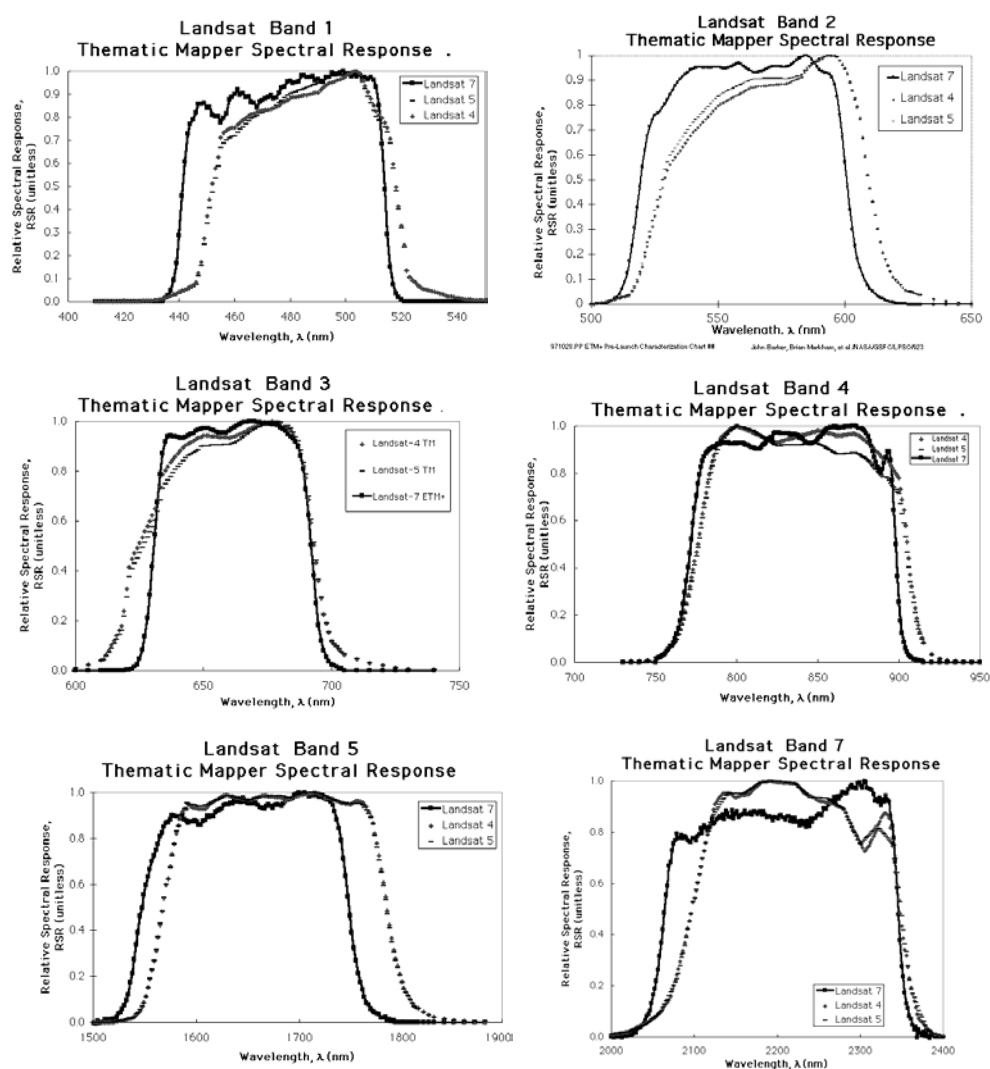


Figura 2 - Resposta espectral nas bandas 1, 2, 3, 4, 5 e 7 do sistema ETM+.

Fonte: <http://ltpwww.gsfc.nasa.gov/IAS/handbook/>

2.2.3 MODIS

O MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectrometer) é um sensor a bordo do satélite Terra (EOS AM-1), lançado em dezembro de 1999, e é hoje o mais importante sensor de mapeamento global. É um sensor de varredura bastante versátil, com um espelho escaneador de movimento cruzado, coletor ótico e um conjunto de arranjos lineares com filtros de interferência espectral localizados em quatro planos focais. Observa a Terra completamente entre 1 e 2 dias, obtendo dados em 36 bandas espectrais em resoluções espaciais que variam de 250 a 1000 m, coletando dados da temperatura da superfície terrestre e oceânica, produtividade primária, cobertura vegetal, aerossóis, nuvens, vapor d'água, perfis de temperatura e queimadas.

O sistema sensor MODIS pode fornecer estimativas de cobertura do solo, LAI, f_{APAR} , GPP (Gross Primary Production, produção primária bruta) e NPP (Net Primary Production, saldo da produção primária), o que o torna conveniente para ser usado em conjunto com modelos de simulação de ecossistemas. As exigências observacionais do sensor levam à necessidade de uma sensibilidade radiométrica bastante alta, bandas espectrais precisas e registro geométrico, aliado à alta precisão relativa e em termos de calibração. Por ser um sistema novo e ainda não completamente validado, é imperativo que os produtos MODIS sejam completamente validados de maneira apropriada. Descreve-se esse sensor nesse trabalho pela sua importância maior hoje em dia como ferramenta de produção de mapas de área foliar em escala continental.

XIONG et al. (2003) avaliaram o desempenho de MODIS durante mais de três anos de operação em órbita, junto com dados de pré-lançamento e estudaram melhorias nas escolhas dos projetos, práticas e procedimentos que podem ser úteis no desenvolvimento de radiômetros multiespectrais lançados no espaço futuramente.

Quadro 1 - Características espectrais e espaciais do sensor MODIS.

Faixa espectral	0.4-14.4 μm
Cobertura espectral	$\pm 55^\circ$, 2330 km (varredura contígua à posição de nadir)
Resolução espacial	250 m (2 bandas), 500 m (5 bandas), 1000 m (29 bandas) à nadir

2.2.3 CBERS

O sistema CBERS (China-Brazil Earth Resources Satellite, Satélite Sino-brasileiro de Recursos Terrestres) é o satélite sino-brasileiro, em sua segunda versão. O CBERS I deixou de se comunicar em 2003, e o sistema sensor CBERS II já se encontra em operação e carrega 3 sensores que trabalham nas bandas e resoluções espaciais descritas nos quadros 1, 2 e 3.

O satélite CBERS 2 é equipado com câmeras para observações ópticas de todo o globo terrestre, além de um sistema de coleta de dados ambientais.

O satélite CBERS está em uma órbita síncrona com o Sol a uma altitude de 778 km, completando 14 revoluções da Terra por dia. Este tipo de órbita é tal que o satélite sempre cruza o Equador às 10:30h, hora local, provendo assim as mesmas condições de iluminação solar para tornar possível a comparação de imagens de regiões de mesma latitude adquiridas em dias diferentes. O sensor CBERS é frequentemente utilizado em pesquisas devido às imagens de baixo custo e os sensores apropriados para a formação de índices de vegetação.

O WFI (Wide Field Imager) é um sensor de largo campo de visada que abrange uma faixa no terreno de 890 km, sendo possível obter uma cobertura completa do globo a cada 5 dias (Quadro 2).

Quadro 2 – Características do Imageador de Amplo Campo de Visada WFI.

Bandas espectrais	0,63 – 0,69 um (vermelho) 0,77 – 0,89 um (infravermelho)
Campo de visada	60°
Resolução espacial	260 x 260 m
Largura da faixa imageada	890 km
Resolução temporal	5 dias

Fonte: CBERS/ INPE, 2004.

O sensor CCD (Charge-Coupled Device) é uma câmera de alta resolução que fornece imagens de uma faixa de 113 km de largura de terreno, com uma resolução espacial de 19,5m x 19,5m (Quadro 3). Qualquer fenômeno detectado pelo sistema WFI pode ser focalizado pela câmera CCD, através de um sistema de apontamento do seu campo de visada, dentro de no máximo três dias após ter sido detectado. O

sistema CCD gasta normalmente 26 dias para uma cobertura completa do globo terrestre.

Quadro 3 – Características da câmera de alta resolução CCD.

Bandas espectrais	0,51 – 0,73 um (pancromático)
	0,45 – 0,52 um (azul)
	0,52 – 0,59 um (verde)
	0,63 – 0,69 um (vermelho)
	0,77 – 0,89 um (infravermelho próximo)
Campo de visada	8,3°
Resolução espacial	20 x 20 m
Largura da faixa imageada	113 km
Capacidade de apontamento do espelho	+32°
Resolução temporal	26 dias com visada vertical
	3 dias com visada lateral

Fonte: CBERS/ INPE, 2004.

O sensor IR-MSS (InfraRed Multispectral Scanner Subsytem) é uma câmera de varredura que opera em quatro faixas espectrais do espectro eletromagnético desde o visível até o termal (Quadro 4).

Quadro 4 – Característica dos Imageador por Varredura de Média Resolução IRMSS.

Bandas espectrais	0,50 – 1,10 um (pancromática)
	1,55 – 1,75 um (infravermelho médio)
	2,08 – 2,35 um (infravermelho médio)
	10,40 – 12,50 um (infravermelho termal)
Campo de visada	8,8°
Resolução espacial	80 x 80 m
Largura da faixa imageada	120 km
Resolução temporal	26 dias com visada vertical

Fonte: CBERS/ INPE, 2004.

2.3 RADIAÇÃO NA FOLHA VEGETAL VERDE, ÍNDICES DE VEGETAÇÃO E ÁREA FOLIAR

2.3.1 Propriedades reflexivas da folha vegetal verde

A folha vegetal verde é composta por uma camada impermeável externa. Essa camada permite as trocas gasosas do organismo com a atmosfera a partir de órgãos localizados na epiderme – os estômatos. A derme de celulose e a água que compõe o interior da folha, assim como as substâncias ativas que trabalham no processo de fotossíntese, fazem com que a folha tenha a característica resposta reflexiva ao espectro, como mostrado esquematicamente e de modo simplificado na figura 3.

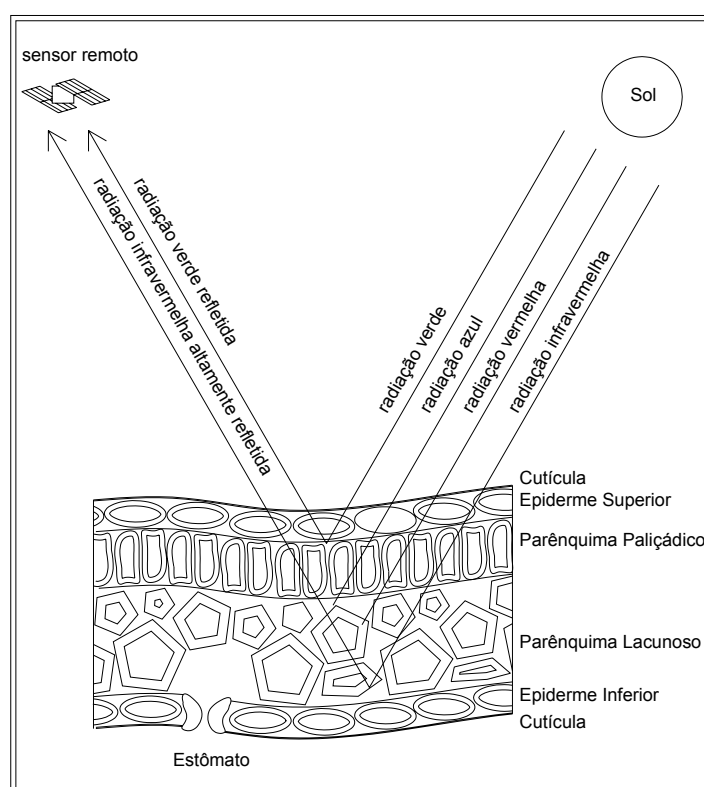


Figura 3 – Interação da reflectância em folha vegetal, segundo a classe de radiação. Adaptado de (JENSEN, 2000).

Essa resposta é influenciada por duas classes de fatores: aqueles relativos às diferenças foliares e outros relativos às diferenças celulares. Como fatores relativos ao nível das folhas, temos a forma do arranjo das folhas, ângulo de disposição das

folhas, formato das folhas, espécie vegetal.. Entre as diferenças celulares podemos citar diferenças estruturais, como a rugosidade da epiderme e as diferenças químicas entre as espécies, como pigmentação e quantidade relativa de água na folha. Os principais pigmentos fotossintetizantes são as clorofilas, os carotenóides e as ficobilinas, os principais tipos de clorofilas são os do tipo *a* e *b*. /as clorofilas do tipo *a* estão presentes em todos os organismos eucariontes fotossintetizantes e cianobactérias. Plantas e algas verdes também contêm a clorofila *b*, que difere quanto ao espectro de absorção. O espectro de ação para a fotossíntese é diretamente relacionado à faixa de absorbância dos principais pigmentos, como mostrado na figura 4.

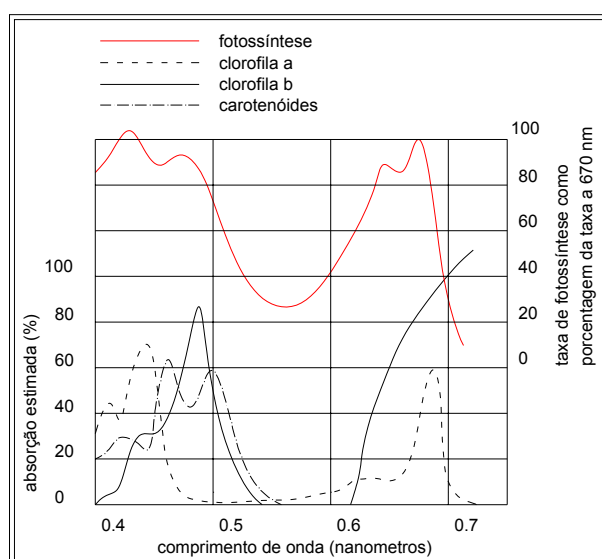


Figura 4 – Faixa de absorbância dos principais pigmentos e sua relação com a taxa de atividade fotossintética ao longo do espectro visível.

Adaptado de (Raven et al., 2000).

2.3.2 propriedades físico-fisiológicas da folha vegetal verde

É importante perceber que a fotossíntese que ocorre nas formações florestais não responde, na prática, diretamente à f_{APAR} . Isso é devido ao comportamento geral de plantas *C3* (denominação dada ao tipo de processo fotossintético utilizado pela planta), categoria predominante entre as espécies arbóreas florestais tropicais, e que necessita de outros alimentadores do processo. Assim, a falta de água (estresse

hídrico) fecha os estômatos da folha que respondem por um processo de turgescência de suas células. Quando a evapotranspiração se faz a uma taxa maior do que a reposição da água no corpo vegetal, por aquela disponível no solo através da ação radicular, ocorre uma desidratação que imediatamente fecha os estômatos proporcionalmente a essa escassez. A presença de água inverte o fenômeno permitindo à planta produzir seu alimento. A capacidade de troca gasosa da planta também é afetada pela umidade do ar. Diferenças fisiológicas entre as espécies, mesmo entre as espécies dominantes, também afetam o desempenho de cada uma de modo bastante significativo (MIRANDA, 2003). A resposta espectral da folha pode variar consideravelmente segundo a disponibilidade de água na folha, como mostrado na figura 4.

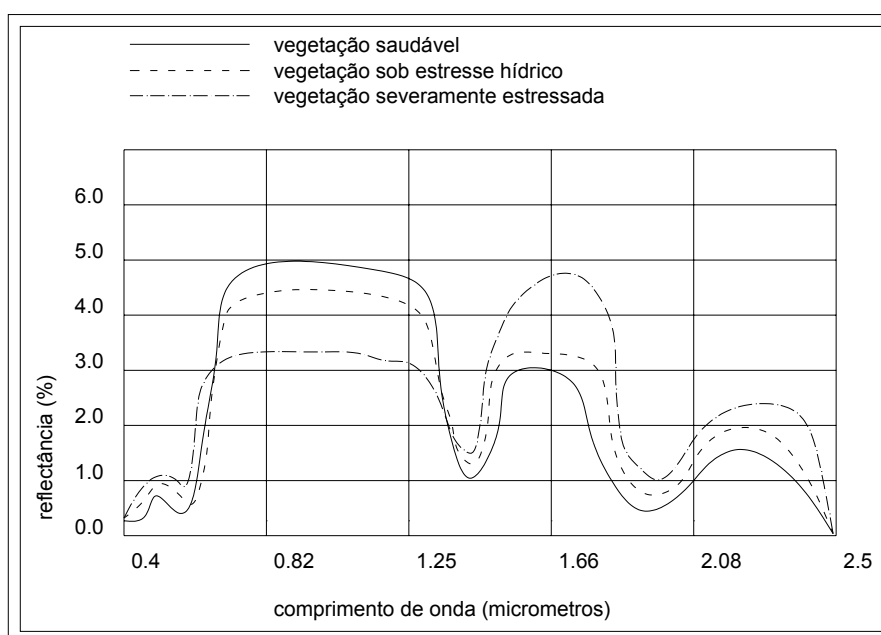


Figura 5 – Variação da reflectância em cobertura vegetal, segundo a disponibilidade de água.

Adaptado de (JENSEN, 2000).

2.3.3 Índices espectrais de vegetação

Um índice de vegetação é um número gerado por uma combinação entre bandas que apresenta relação empírica com a quantidade ou qualidade de vegetação

acusada no pixel de uma imagem. Apresentam-se em seguida breves definições de diferentes índices encontrados na literatura. Alguns índices e principais características:

a) SR

Razão Simples (SR - Simple Ratio ou RVI – Ratio Vegetation Index), é dado pela razão simples entre as reflectâncias observadas na banda do vermelho e infravermelho:

$$RVI = \frac{\rho_{NIR}}{\rho_{red}} \quad (1)$$

b) NDVI

(Normalized Difference Vegetation Index, KRIEGLER et al., 1973), RVI e NDVI são funcionalmente equivalentes e relacionados por

$$NDVI = \frac{RVI - 1}{RVI + 1} \quad (2)$$

tem a vantagem de variar entre -1 e 1, enquanto o RVI varia entre 0 e infinito:

$$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{red}}{\rho_{NIR} + \rho_{red}} \quad (3)$$

c) IPVI

(Infrared Percentage Vegetation Index, CRIPPEN, 1990), é funcionalmente equivalente ao NDVI e relacionado por:

$$IPVI = \frac{NDVI + 1}{2} \quad (4)$$

Tem a vantagem computacional de apresentar somente valores positivos, variando entre 0 e 1:

$$IPVI = \frac{\rho_{NIR}}{\rho_{NIR} + \rho_{red}} \quad (5)$$

Uma listagem mais abrangente dos índices espectrais de vegetação é dada no anexo 3.

2.3.4 Índice de Área Foliar - IAF

O índice de área foliar (razão da área compreendida por uma das faces da folha por unidade de área do terreno) refere-se aqui sempre à área foliar composta

por folhas verdes. Ele depende da composição de espécies vegetais, do estágio de desenvolvimento da vegetação, das condições ambientais do local, da sazonalidade e das práticas de manejo florestal (JONCKHEERE et al., 2004).

O índice de área foliar (IAF ou LAI – Leaf Area Index) pode ser calculado de diversas maneiras, cada qual com sua precisão estimada. Entre esses métodos podemos citar:

- a) O uso de fotografias hemisféricas, método usado no presente trabalho;
- b) Medições destrutivas com o abate e contagem direta das folhas;
- c) Uso de equipamentos especiais;
- d) Uso de sensores dispostos em diferentes alturas relacionados pela Lei de Lambert-Beer .

2.3.5 Fotografias Hemisféricas

O método de estimativa de área foliar através de fotografia hemisférica é uma técnica de menor custo e de rápida execução, não destrutivo e de fácil repetição. Diversos trabalhos têm provado que o uso das fotografias hemisféricas pode ser um método indireto poderoso para medir vários componentes da estrutura do dossel e sob diversos regimes de luz. Os avanços na análise hemisférica, que ocorreram na última década, estão diretamente relacionados com envolvimento computacional, tecnologias fotográficas e digitais, e os métodos de modelagem científicos (JONCKHEERE et al., 2004).

O software de análise de fotografias utilizado é o Gap Light Analyser 2.0, de licença *freeware*.

Por essas vantagens, e devido ao grande número de fotografias que se pretendia adquirir, foi escolhido o método de determinação de área foliar pela análise de fotografias hemisféricas, nesse estudo.

O Gap Light Analyzer (GLA) é um programa baseado em plataforma Windows projetado para importar, mostrar e analisar fotografias hemisféricas do dossel vegetal. Foi desenvolvido a partir de um programa de análise de imagens coloridas, GLI/C, criado pelo Dr. Charles Canham do Institute of Ecosystem Studies (IES), Millbrook, New York (CANHAM, 1995). GLI/C — agora chamado GLA —

foi modificado de modo a incluir um modelo de radiação global que leva em consideração as influências da topografia e dos padrões sazonais de nebulosidade. O GLA calcula a abertura do dossel, o índice de área foliar efetiva (Le) a distribuição de frequência solar e duração do dia, e a quantidade de radiação (transmitida acima e abaixo do dossel) incidente direta, difusa e total em uma superfície horizontal.

A figura 6 apresenta uma fotografia típica da área de estudo e sua correspondente classificada. O software trabalha computando as áreas brancas e negras e calculando as proporções em diferentes ângulos concêntricos, cada qual correspondente a uma área que é função da altura média das árvores do sítio de estudo.

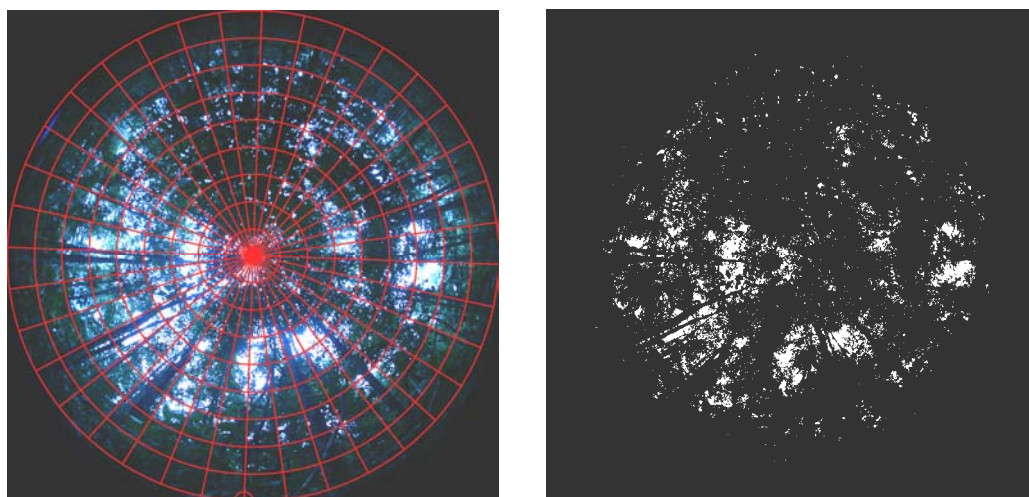


Figura 6 – Fotografia hemisférica em um ponto da área de estudo (à esquerda) e sua correspondente classificação (à direita).

São computadas as áreas brancas e negras em diferentes regiões circulares concêntricas correspondentes a diferentes cones angulares.

2.3.6 Medições Destrutivas com o Abate e Contagem Direta das Folhas

Com a utilização de métodos estatísticos, a partir de uma amostragem de espécies dominantes e através do abate total ou corte parcial de galhos, procede-se à contagem de folhas, que têm sua área média determinada por algum dentre vários métodos disponíveis, como escaneamento direto, ou análise classificatória de fotografias digitais com escala conhecida.

2.3.7 Uso de Equipamento Especial

Um exemplo de equipamento especial é o LAI 2000 (LI-COR Co.), que se vale de um ou mais sensores de radiação que fornecem uma leitura do valor do IAF. Outros equipamentos possuem diversos sensores distribuídos ao longo de uma barra suporte, que podem medir simultaneamente efeitos de claro-escuro devido à sombra em dosséis esparsos ou baixos.

2.4 MAPEAMENTO DE ÁREA FOLIAR

Os estudos existentes com o objetivo de criar um produto como um mapa de área foliar e/ou mapa de fração da radiação fotossinteticamente ativa absorvida (f_{APAR} – fraction of absorbed photossintetically active radiation) têm sido executados mundialmente, com maior destaque pelo projeto BigFoot, de autoria principal de Warren B. Cohen, Stith T. Gower, David P. Turner e Steven W. Running (RUNNING et al., 1999). Programa onde o objetivo principal é fornecer validação dos produtos (na forma de mapas temáticos) de cobertura do solo, temperatura, índice de área foliar (LAI), fração absorvida da radiação fotossinteticamente ativa (f_{APAR}) e produtividade líquida do ecossistema (NPP) obtidos através das imagens do sistema MODIS, usando medições *in situ*, sensoriamento remoto e modelos de simulação de ecossistemas em sítios experimentais representando diversos biomas.

TER STEEGE et al. *in press* ressaltam que, embora a modelagem e o mapeamento da biodiversidade sejam uma ferramenta de grande utilidade para a ecologia e para estudos sobre conservação de ecossistemas, ainda são poucos os mapas já produzidos para as florestas do mundo. As informações obtidas desses mapas são importantes para estudos climáticos e para alimentar modelos de balanço energético global. Mapas de área foliar têm várias aplicações possíveis, entre elas pode-se destacar a alimentação regular de modelos globais que precisam ser atualizados constantemente.

Estudos que correlacionem imagens de sensoriamento remoto com dados coletados *in loco* necessitam correção atmosférica das imagens utilizadas. Por outro lado, para se efetuar o inter-relacionamento de dados coletados *in situ*, como índice

de área foliar e de f_{APAR} por exemplo, com os adquiridos por sensoriamento remoto, é necessário também se efetuar criteriosamente, em relação às propriedades temporais e espaciais, a seleção de imagens e sensores adequados.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

3.1.1 Localização Geográfica

Este estudo foi desenvolvido em uma área localizada a aproximadamente 50 km NE da cidade de Sinop, pertencente à bacia do rio Teles Pires, no médio Norte de Mato Grosso, Brasil ($11^{\circ}24.75'S$: $55^{\circ}19.50'O$). A área estudada está compreendida entre as coordenadas $55^{\circ}30'0,0''$ e $55^{\circ}0'0,0''$ O, e $10^{\circ}45'0,0''$ e $11^{\circ}15'0,0''$ S, conforme figura 7.

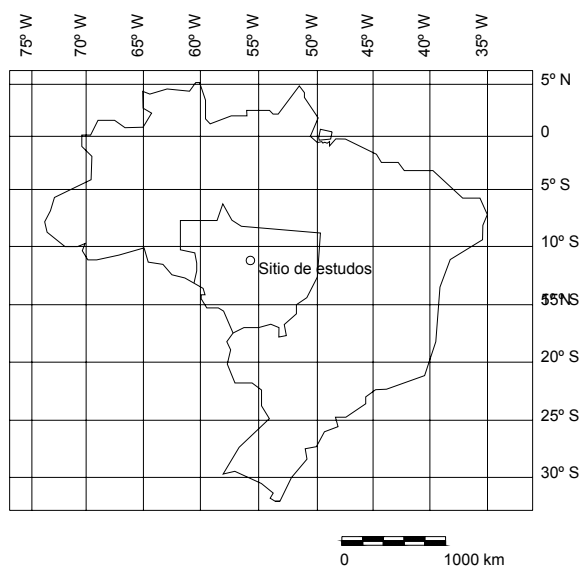


Figura 7 – Localização da área de estudo.

3.1.2 Caracterização Geo-ecológica

Em junho de 2002, um transecto de 1 há (20 m x 500 m) foi instalado na Fazenda Maracaí, município de Claudia, sendo localizado próximo ao sul da zona do “arco do desflorestamento” mostrado na figura 8, no médio Norte de Mato Grosso. As extensas florestas de transição entre o Cerrado e a Amazônia sofrem uma das maiores taxas de desmatamento no país, e são pobremente conhecidas do ponto de vista científico (SULI et al., 2003). A Fazenda Maracaí, está localizada 50 km ao norte da região metropolitana do município de Sinop, no centro norte do Estado. A localização e abrangência das eco-regiões do Estado encontram-se representadas na figura 9.

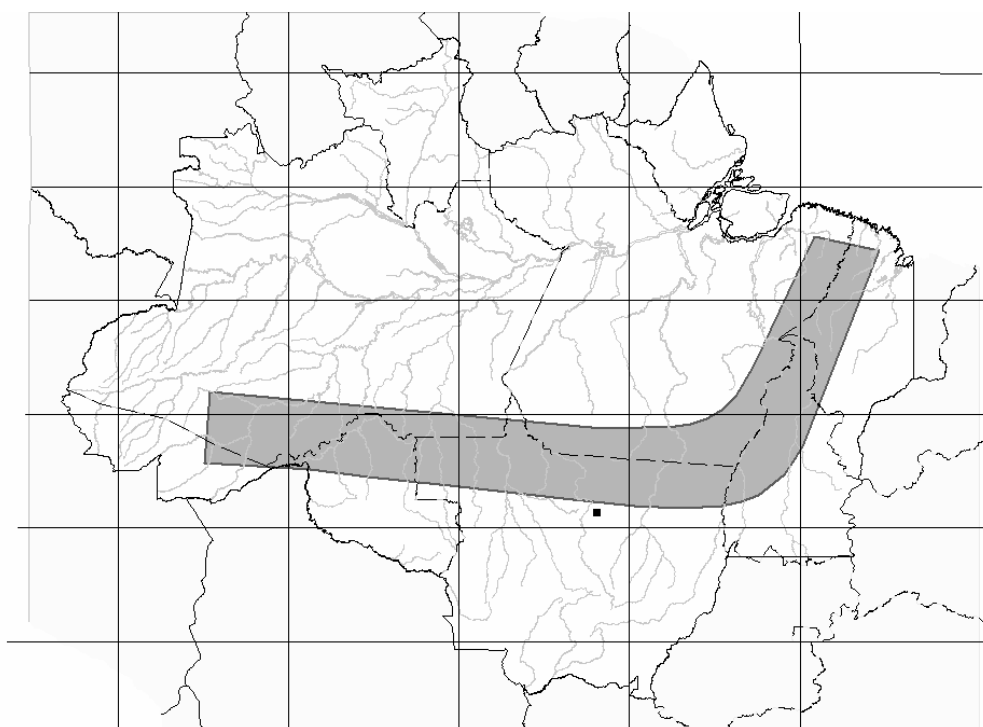


Figura 8 – Posição do “arco do desflorestamento” e área de estudos.
Fonte: Ministério do Meio Ambiente.

Clima e solo são fatores determinantes de variações na fitofisionomia da vegetação, e na distribuição geográfica e de abundância das espécies dominantes. Como exemplo, a espécie dominante em Sinop (*Tovomita schomburgkii* Planch &

Triana, 1860), é pouco abundante em uma floresta localizada no município de Alta Floresta, distante 350 km ao norte.

A área de estudo caracteriza-se por apresentar um período de seca prolongado em relação à porção norte da Amazônia. Os solos da área de estudo são classificados como bastante arenosos, ultisolos (distróficos) pobres em nutrientes (RATTER, 1992). Esses solos têm alta porosidade e drenam rapidamente a saturação provocada por fortes chuvas (num espaço de tempo compreendido entre 4 e 7 dias) (GIRARD et al., não publicado, 2001).

A vegetação consiste em espécies arbóreas, verde durante todo o ano, com espécies características da floresta de transição amazônica, como *Tovomita schomburgkii*, *Qualea paraensis* e *Brosimum lactescens*. A vegetação tem o aspecto mostrado na figura 10.

A distribuição de famílias também apresenta diferenças marcantes em termos de abundância e presença (SULI et al., 2003). A figura 11 apresenta a distribuição de espécies arbóreas por família e a figura 12 a distribuição de indivíduos amostrados por família.

Não há espécies com clara dominância, embora alguns dados preliminares apontem que, para um hectare amostrado, aproximadamente 20% dos indivíduos com diâmetro à altura do peito (DAP) maior que 10 cm eram da espécie *Tovomita schomburgkii*. A diversidade é alta, embora menor do que a da floresta amazônica situada em direção ao centro da Amazônia. Como indicativo da biodiversidade, pode-se apontar o índice de Hurlbert, calculado por reamostragem aleatória, $J' = 0.749 \pm 0.108$ (SULI et al., 2003).



Figura 9 – Eco-regiões do Estado de Mato Grosso.
Fonte: Ministério do Meio Ambiente.



Figura 10 – Aspecto da região de estudos em 23/08/2003. As árvores floridas são da espécie *Qualea paraensis*.

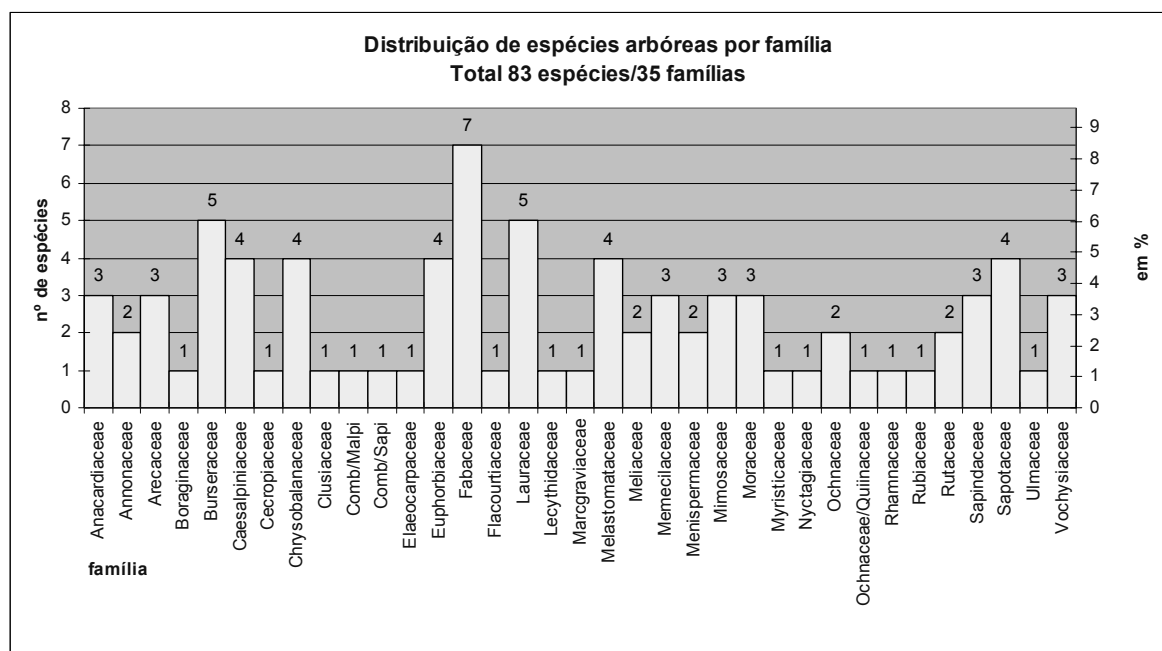


Figura 11 – Distribuição de espécies arbóreas por família.

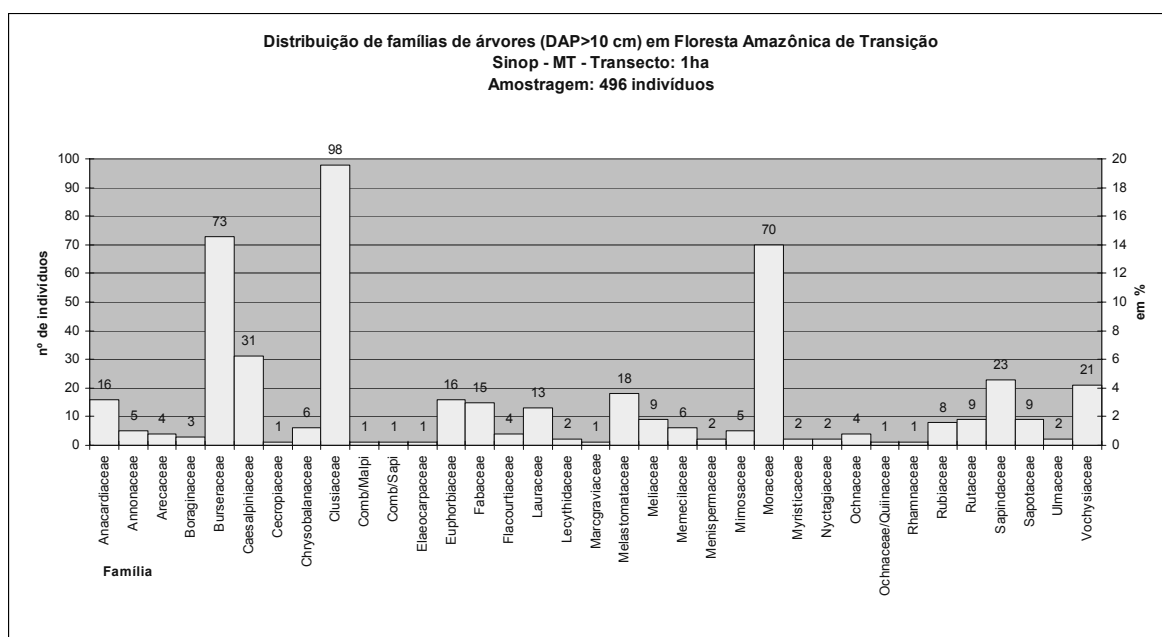


Figura 12 – Distribuição de indivíduos amostrados por família.

3.1.3 Caracterização Climatológica

A área de estudo é uma região de transição entre a floresta tropical úmida e o cerrado, que apresenta uma sazonalidade característica. Nos últimos 30 anos, a temperatura média anual é de 24°C com pequena variação nas estações, e uma

precipitação média de 2000 mm/ano, com quatro meses de estação seca entre junho e setembro; quatro meses de estação úmida, entre dezembro e março; e quatro meses de transição entre outubro e novembro e abril e maio, conforme tabelas 1, 2 e 3. As características climatológicas da floresta de transição são similares à precipitação de floresta e cerrado, entretanto, nesta região a floresta recebe aproximadamente 200 mm a menos de precipitação anual que a floresta úmida e 500 mm mais precipitação que o cerrado (VOURLITIS et al., 2002).

Tabela 1 - Precipitação para a área em estudo.

Mês (mm)	Precipitação mensal (mm)		
	2001	2002	2003
Janeiro	366	388	600
Fevereiro	165	334	271
Março	255	326	382
Abril	0	23	276
Maio	0	0	70
Junho	0	0	0
Julho	0	0	0
Agosto	5	0	0
Setembro	177	62	25
Outubro	189	172	273
Novembro	365	218	383
Dezembro	484	338	365
Precipitação anual	2006	1861	2645

Fonte: Estação meteorológica Fazenda Continental.

Tabela 2 - Umidade relativa do ar para a área em estudo.

Mês (mm)	Umidade relativa do ar (%)		
	2001	2002	2003
Janeiro	88,49	85,84	85,87
Fevereiro	86,84	86,56	84,68
Março	87,85	83,39	84,60
Abril	84,48	81,10	80,21
Maio	82,74	79,06	82,95
Junho	78,34	72,19	74,54
Julho	72,19	71,49	69,88
Agosto	62,77	65,94	64,93
Setembro	77,47	72,78	72,86
Outubro	79,71	76,76	82,83
Novembro	85,50	77,11	85,47
Dezembro	87,79	83,32	85,70

Fonte: Projeto LBA – MT.

Tabela 3 - Temperatura média do ar para a área em estudo.

Mês (m)	Temperatura média do ar (°C)		
	2001	2002	2003
Janeiro	25,28	25,70	25,01
Fevereiro	26,02	27,07	24,82
Março	25,93	27,54	25,31
Abril	26,37	24,05	26,37
Maio	26,23	26,38	25,89
Junho	24,50	26,55	24,16
Julho	25,38	25,31	23,09
Agosto	25,53	28,15	24,76
Setembro	26,60	28,75	25,60
Outubro	26,66	29,02	26,22
Novembro	25,44	30,29	25,93
Dezembro	25,01	28,67	26,38

Fonte: Projeto LBA – MT.

3.2 MATERIAIS UTILIZADOS

3.2.1 Imagens de Satélite

As imagens de satélite utilizadas no presente estudo estão apresentadas no quadro 5.

Quadro 5 – Imagens de satélite utilizadas no presente estudo.

Sensor	Data de aquisição	Bandas
IKONOS	30/04/2000	1, 2, 3, 4
	19/05/2001	1, 2, 3, 4
	05/07/2002	1, 2, 3, 4
LANDSAT 7 TM+ (226-068)	18/06/2000	1, 2, 3, 4, 5, 7

3.2.2 Equipamentos Utilizados

Os aparelhos utilizados no presente trabalho foram Data Logger CRX-10, GPS Garmim 12XL, Teodolito, Bússola Brunton, Clinômetro, Câmera digital Nikon Coolpix 4.300, Lente Nikon FC-E8 Fisheye e Sensor PAR LITE, Kipp & Zonen

Descrição do Sensor PAR LITE, Kipp & Zonen

É um instrumento para a medição da densidade de fluxo de fótons fotossintéticos, na prática, essa quantidade é chamada PAR (Photosynthetically Active Radiation). Essa medição representa o número de fótons incidente entre 400 e 700 nanômetros por metro quadrado por segundo, figura 13. Esses fótons podem ser usados pelas plantas verdes para o processo de fotossíntese. O sensor mede os fótons recebidos em todo o hemisfério (campo de visão de 180°). A saída é expressa em micro moles por segundo por metro quadrado. Existem na torre de coleta de dados micrometeorológicos do sítio de estudos da Fazenda Continental 3 sensores dispostos com a face sensível apontada para cima, nas alturas de 1, 20, e 42 m. De modo que são registrados valores da PAR incidente total e valores parciais, filtrados pela ação da canópia. Outro sensor, também a 42 m, porém com sua face sensível apontada para baixo coleta a radiação fotossinteticamente ativa refletida (PAR_r), figura 14.

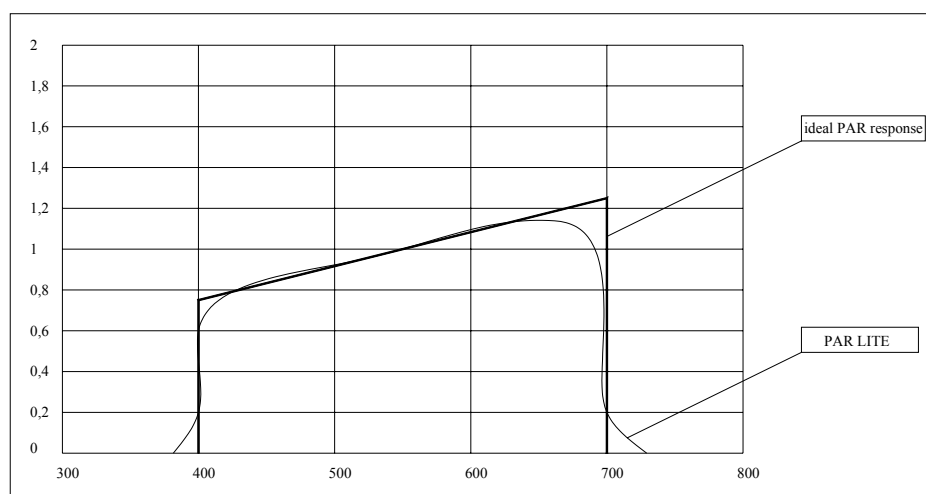


Figura 13 – Sensitividade espectral relativa do sensor e resposta espectral à radiação PAR ideal.

Extraído de Instruction Manual PAR LITE; Sci-Tec Instruments Kipp & Zonen.

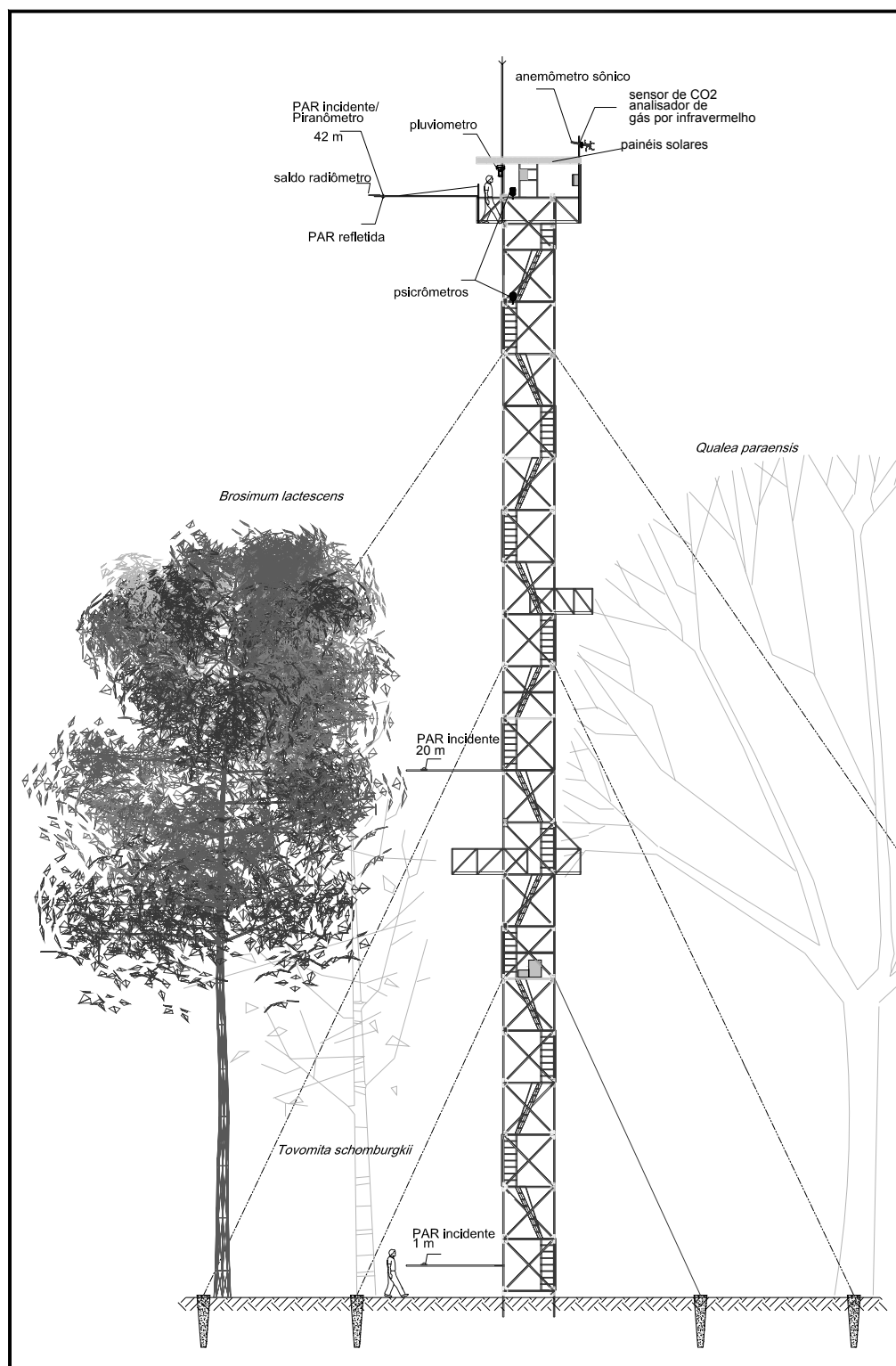


Figura 14 – Torre-suporte e alguns instrumentos de coleta de dados micro climáticos do sítio de estudos da fazenda Maracaí.

3.3 MÉTODOS

3.3.1 Georreferenciamento

Neste estudo, o georreferenciamento principal é o georreferenciamento relativo, dos aspectos distinguíveis na imagem com os pontos de coletas plotados, tendo como referência os acidentes ou componentes da imagem que podem ser identificados a olho nu. Assim, essa distribuição relativa entre pontos é mais importante que o georreferenciamento terrestre absoluto. As imagens adquiridas foram georreferenciadas pela equipe EOS. Sua precisão foi avaliada visualmente pela sobreposição de imagens IKONOS de diferentes anos (2000, 2001, 2002) e imagens Landsat 7 de 1999 e 2001.

3.3.2 Calibração Radiométrica

Os produtos IKONOS tiveram sua correção radiométrica executada através de SE-REF-016 (documentação das imagens IKONOS)

Os produtos Landsat 7 tiveram sua correção radiométrica executada através do manual *on line* do sistema Landsat 7, Landsat 7 Science Data Users Handbook, obtido de <http://ftpwww.gsfc.nasa.gov/IAS/handbook/handbook.html>. Para maiores detalhes, ver anexo 1.

3.3.3 Transformação de Valores Digitais

A transformação de valores digitais em valores de reflectância e radiância é feita através das equações diretrizes e coeficientes de transformação dos valores digitais para valores de radiância (calibração radiométrica) e reflectância contidos em SE-REF-016 (documentação das imagens IKONOS), para as imagens Ikonos e através de Landsat 7 Science Data Users Handbook, para imagens Landsat.

3.3.4 Correção Atmosférica

A correção atmosférica das imagens foi realizada de forma aproximada através do software IDRISI, segundo procedimento descrito no anexo 1, a descrição do algoritmo é encontrada em (SHALINA et al., 1996) e aplicada em (MARQUES et

al., 2004). Os resultados são visíveis (aumento do contraste nas imagens com correção atmosférica) através da figura 15.

A acurácia da correção atmosférica depende da qualidade dos dados disponíveis para alimentação do algoritmo. Devido ao subdesenvolvimento da região e à falta de monitoramento governamental, como por meio de equipamentos situados em aeroportos, por exemplo, alguns desses dados não são disponíveis ou são inexistentes. A falta de dados como visibilidade impossibilitou a utilização de softwares como o Msixs, e exigiu suposições e estimativas indiretas.

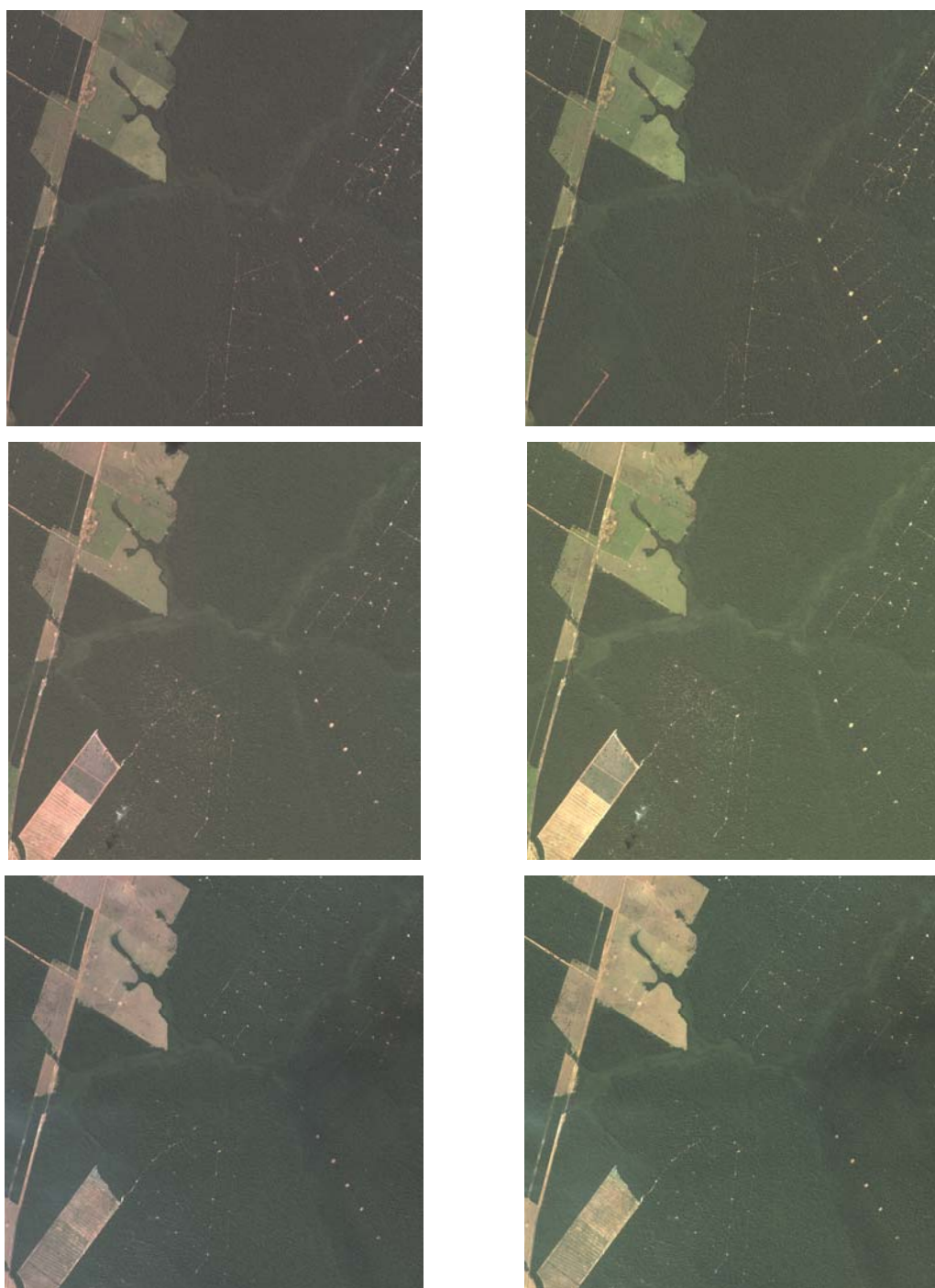


Figura 15 – Pares de imagens IKONOS, em série temporal de 2000, 2001 e 2002 (de cima para baixo), com valores de reflectância, em composição RGB, nas bandas 1, 2 e 3, corrigidas (à direita) e sem correção atmosférica (à esquerda). Percebe-se o avanço da exploração madeireira por manejo seletivo e a correspondente regeneração das áreas exploradas primeiramente. A formação vegetal na faixa central representa a mata ciliar.

3.3.5 Disposição dos Pontos de Tomadas de Fotos Hemisféricas

Foi executada a locação de um arranjo com técnicas topográficas (através do uso de teodolito, mira, trena e bússola corrigida para a declinação magnética local), a localização pode ser vista nas figuras 16, 17 e 18 e disposto segundo as figuras 19 e 20. Dessa forma, foram plotados 20 pontos no interior da formação florestal estudada, o *grid* tem sua direção principal orientada para 48°58'48"NO, com 480 m no seu maior eixo, e 20 m de largura. Os pontos locados estão distanciados 40 m entre si. Esse espaçamento foi escolhido devido à altura média do dossel, considerado aqui, através de medições com clinômetro, de aproximadamente 28 m de altura. Essa altura média determina o raio médio de abrangência da fotografia hemisférica. Outros 20 pontos estudados foram aqueles ocupados por caixas de coleta de liteira e dispostos irregularmente, segundo as figuras 20 e 21.



Figura 16 – Composição RGB das bandas 3, 4 e 5 Landsat 7ETM+, ao centro, locação da amostragem de fotografias hemisféricas (retângulo vermelho), e a via de acesso (estrada vicinal/trilha em amarelo), que parte da rodovia BR-163 a partir do entroncamento com a MT-423.

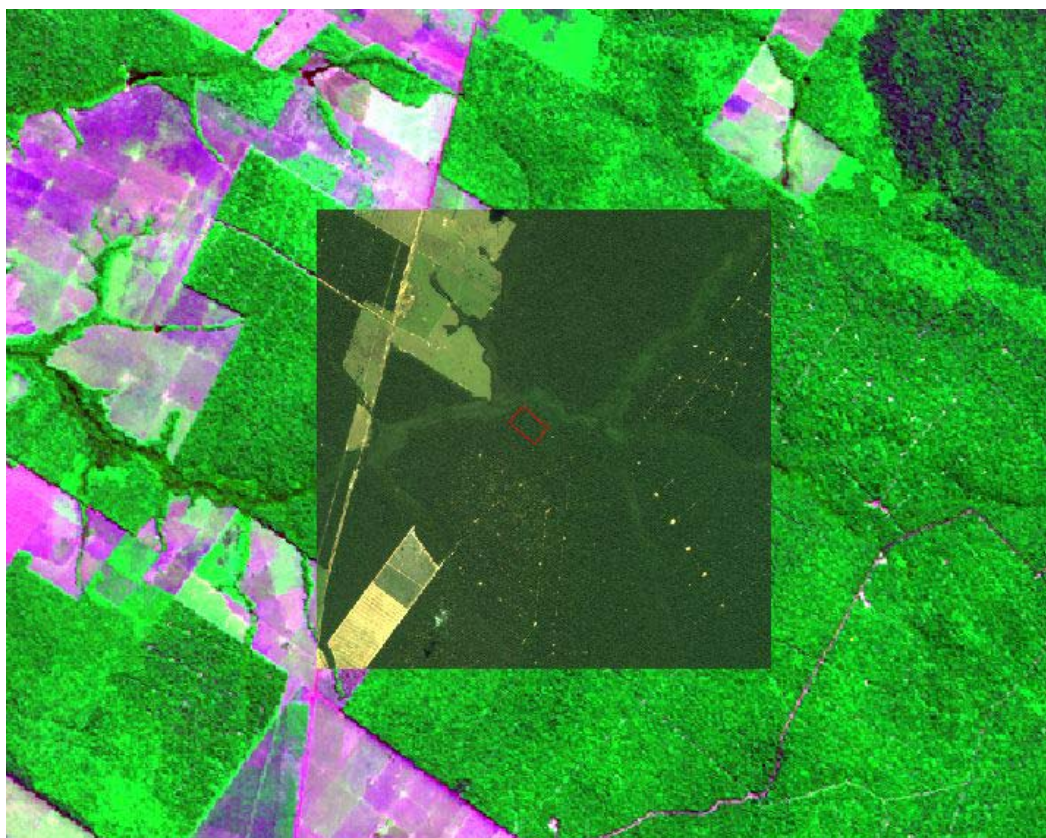


Figura 17 – Composição RGB das bandas 3, 4 e 5, Landsat 7ETM+ de 18/06/2000, ao centro, sobreposição de uma imagem IKONOS (19/05/2001), RGB, bandas 1,2 e 3. Resolução espacial: Landsat 29,5 m; IKONOS 4 m.



Figura 18 – Imagem IKONOS (19/05/2001), RGB, bandas 1, 2 e 3. Ao centro, locação do *grid* de amostragem. Imagem sobre RGB das bandas 3, 4 e 5, Landsat 7ETM+ de 18/06/2000.

Essa composição destaca o estado do manejo seletivo em 2001.

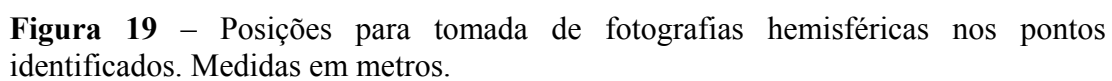


Figura 19 – Posições para tomada de fotografias hemisféricas nos pontos identificados. Medidas em metros.

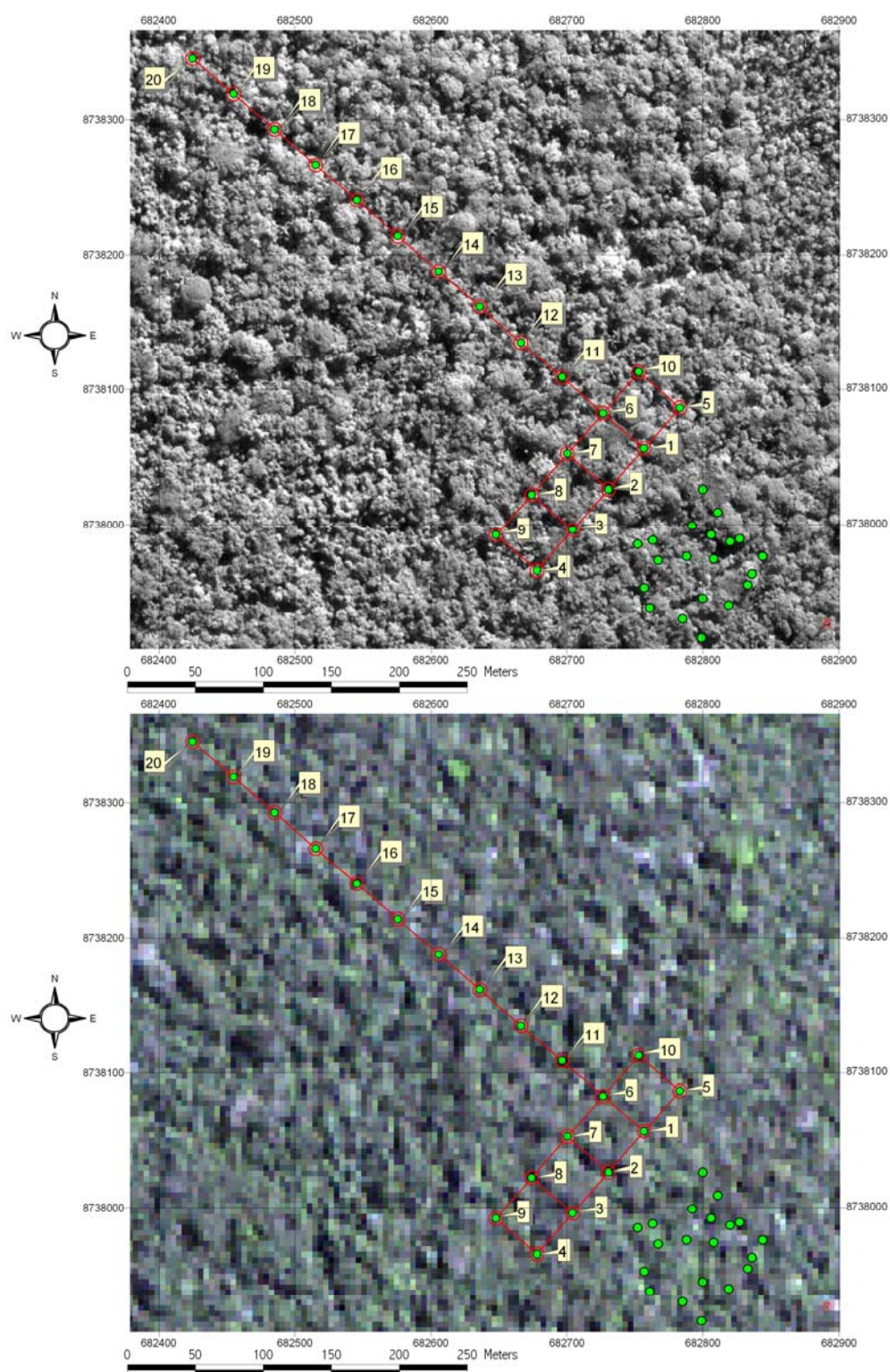


Figura 20 – Arranjo para tomada de fotografias hemisféricas (pontos unidos por linhas em vermelho distanciadas de 40 m), no transecto de amostragem botânica e pontos de coleta de liteira (pontos esparsos em verde). Imagem superior com resolução de 1 m (IKONOS pan) e inferior com resolução de 4 m (IKONOS RGB).

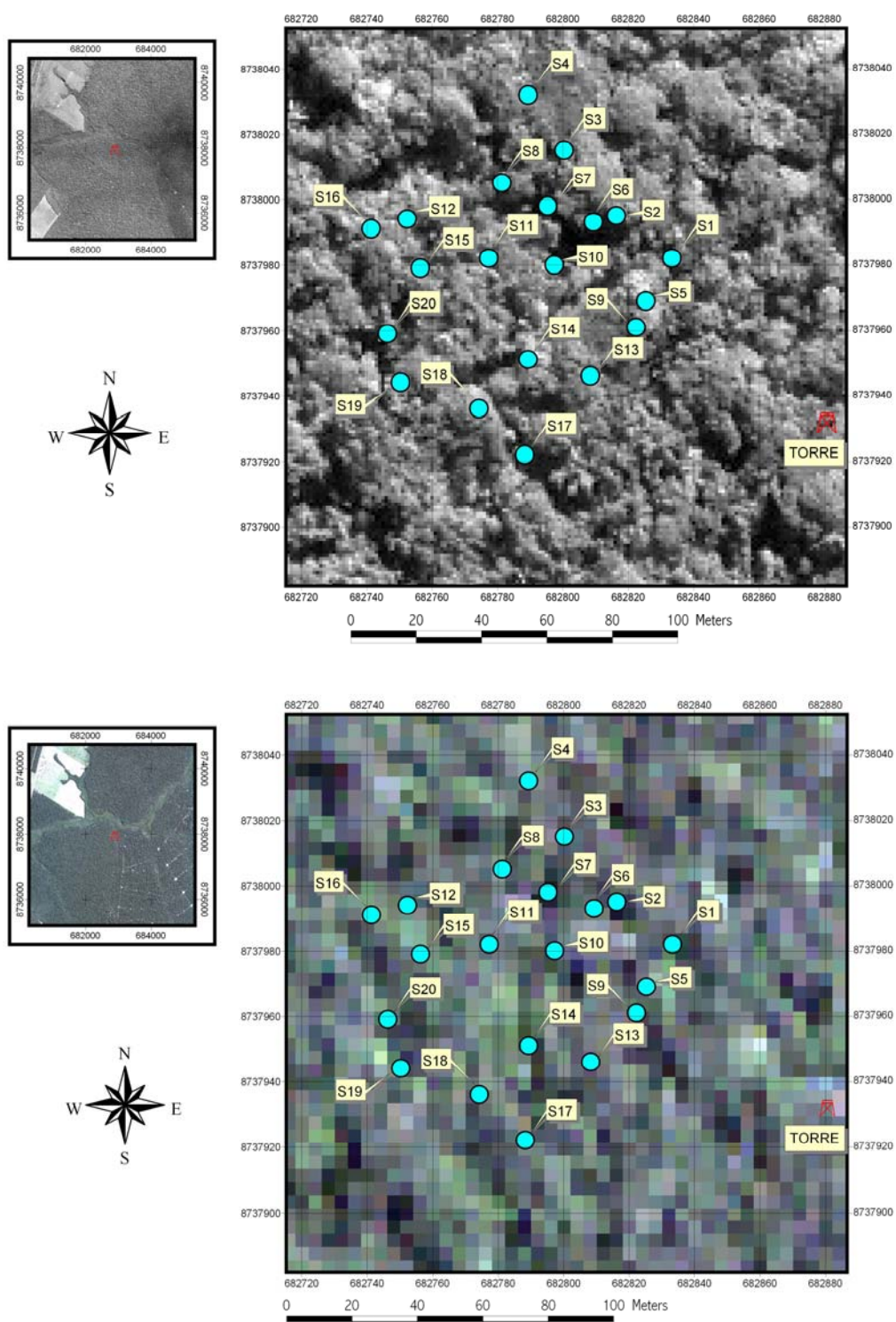


Figura 21 – Arranjo para tomada de fotografias hemisféricas nos pontos de coleta de liteira no sítio de estudo. Imagem superior com resolução de 1 m (IKONOS pan) e inferior com resolução de 4 m (IKONOS RGB).

3.3.6 Procedimento para a tomada de fotografias

A amostragem foi realizada de acordo com a disposição geométrica (do *grid* proposto e das posições de coleta de liteira), figuras 16 a 18. A câmera fotográfica digital era posicionada com a parte superior alinhada com o Norte magnético. No total, 40 pontos foram amostrados usando fotografias hemisféricas.

O dossel florestal foi fotografado do solo para o céu usando uma câmera digital Nikon Coolpix 4.300, Lente Nikon FC-E8 Fisheye. A câmera foi montada sobre um tripé ajustável de forma a nivelar horizontalmente a máquina e alinhar com o Norte. Uma bússola corrigida para a declinação magnética local era usada para alinhar a câmera a cada vez que tripé era movido. O tripé era colocado sobre o ponto central de um marcador fixado ao solo. Uma distância lateral era dada cada vez que o ponto marcado topograficamente era vizinho de alguma árvore com mais de 30 cm de DAP. Como regra geral, a câmera era posicionada a 1 m acima do solo e a um mínimo de 2 m de qualquer árvore com $DAP > 30$ cm. Qualquer folhagem pendente num raio de 1 m da lente era puxada para o lado a fim de evitar influência nos resultados. Para evitar autos-retratos, os operadores se colocavam abaixo do nível da lente durante as exposições. As fotos e características dos pontos eram numerados, comentados e anotados, uma vez que as fotografias hemisféricas são de difícil reconhecimento, pois são muito parecidas e os dados devem seguir uma cronosequência quando da coleta. Pontos que estivessem em zonas com árvores caídas eram excluídos por causa da defasagem temporal entre imagens e fotografias, ou seja, para evitar comparações de área foliar de uma zona no presente com uma ou mais árvores ao solo, com sua situação passada mais arborizada.

3.3.7 Procedimentos Utilizados nas Transformações para a correlação entre IAF e NDVI

Os procedimentos utilizados nas transformações em *Upscale/Downscale*, foram adaptados da metodologia descrita por TIAN et al. (2002), para análise em multi-escala, ou seja, correlacionando sensores de diferentes resoluções espaciais, e validação de mapas de área foliar verde LAI.

1. Coleta de dados no campo segundo uma geometria definida ou pelo menos conhecida de dados georreferenciados. A coleta de cada conjunto de dados a princípio deve abranger ao menos a área ocupada por um píxel da imagem-produto final.
2. Determinação da área de abrangência das medidas de LAI efetuadas e de sua variação temporal.

$$A = \pi R^2 = \pi(h \cdot \operatorname{tg} \theta)^2 = \pi(h \cdot 3)^2 \quad (6)$$

Onde $h_{\text{médio}} = 28$ m, altura do dossel; e $\operatorname{tg} \theta = 3$, para evitar interferência periférica, sendo θ o ângulo do cone semi-esférico.

3. Correção atmosférica das imagens utilizadas.
4. Registro acurado das imagens para a sobreposição dos dados. Para minimização de erros quando se trata de imagens de baixa resolução espacial, e quando a amostragem for pequena para a resolução pretendida, é conveniente a utilização de sensores de alta resolução relativa ao produto final.
5. Transformação do NDVI ou IPVI (valores dos píxels na imagem) em IAF através de uma equação de regressão ajustada entre os dados obtidos em campo e aqueles lidos nos píxels da imagem. Essa é propriamente a produção de um mapa de área foliar.
6. Verificação do produto. Por exemplo:

$$DL = (LAI_{\text{método1}} - LAI_{\text{método2}}) / LAI_{\text{método1}} \quad (7)$$

Se DL for positivo, o método 2 subestima os valores medidos (no caso de LAI). Esse valor retorna uma percentagem (se multiplicado por 100) do erro entre métodos. É interessante essa quantificação para cada padrão classificado, e atentar para o fato de que quando a resolução espacial diminui (por exemplo, de 30 para 1000 m), os valores são influenciados pela mistura de píxels de diferentes coberturas.

3.3.8 Tratamento Estatístico

Os resultados obtidos com o método de fotografias hemisféricas para a determinação da área foliar foram comparados com os resultados de NDVI estatisticamente através de uma equação de regressão que melhor se ajustasse à distribuição de dados, se essa correlação fosse encontrada para as condições do experimento.

Como parâmetros de avaliação dos resultados das comparações, foram também executados testes através do índice de concordância d (WILLMOTT, 1982).

$$d = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^N (P_i - O_i)}{\sum_{i=1}^N (|P'_i| - |O'_i|)^2} \right] \quad (8)$$

$$0 \leq d \leq 1$$

Também foram realizadas medidas estatísticas de diferença propostas por WILLMOTT, 1982, raiz do erro quadrático médio, RMSE (*Root Mean Square Error*) e o erro absoluto médio, MAE (*Mean Absolute Error*).

$$RMSE = \left[N^{-1} \sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2 \right]^{1/2} \quad (9)$$

e

$$MAE = N^{-1} \sum_{i=1}^N |P_i - O_i| \quad (10)$$

Onde,

$$P'_i = P_i - \bar{O},$$

$$O'_i = O_i - \bar{O},$$

e N é o número de casos.

Nas equações acima, P_i representa o valor proposto à comparação com O_i (valores ‘predito’ e ‘observado’, segundo aplicação do d de Willmott para modelo de evaporação, em WILLMOTT, 1982) aqui tomados como pares IAF_{GROUND} - IAF_{IPVI} (IAF tomados pelo método fotográfico de campo e IAF calculado através de sua relação com o IPVI, respectivamente). Também foram considerados pares $P_i - O_i$, os valores de IAF_{GROUND} - IAF_{IPVI} comparados com os valores de IAF_{GROUND} - IAF_{IPVI} entre os três anos. Desse modo o índice de concordância d obtido é um parâmetro adicional e predominante de avaliação comparativa sobre o resultado dos testes t executados entre as populações de dados, entre níveis e entre métodos. Para a determinação do intervalo de confiança dos valores dos índices de concordância foi utilizada a técnica de bootstrapping, na qual os conjuntos de pares temporais $P_i - O_i$, tinham seu valor d calculado. Assim, por reamostragem randômica com reposição é gerada uma nova população de pares para a determinação de um novo d . O

procedimento foi repetido mil vezes, gerando uma população de índices de concordância, obtida por re-amostragem aleatória com reposição, da qual foram calculados os percentis para um intervalo de confiança de 95%. Para isso utilizou-se o programa Resampling Software (Resampling Stats, Inc). Esse procedimento foi executado para se quantificar o erro cometido ao estimar qualquer dos valores acima, tendo como base uma amostra de médias de reflectâncias ou de índice de vegetação, de uma população de pixels a qual se presume de distribuição aleatória. Segundo WILLMOTT (1982) o valor d é diretamente comparável com o fator de correlação de Pearson (r) ou com o seu quadrado (r^2). Por isso, nessa análise, os valores r e r^2 seriam preteridos em favor do índice de concordância d . Assim como r^2 , d é considerado tão mais significativo (indicativo de relação positiva entre as variáveis), quanto mais próximo de 1.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 ESTIMATIVA DO ÍNDICE DE ÁREA FOLIAR

Foi realizada a estimativa do Índice de Área Foliar a partir das fotografias hemisféricas nos quarenta pontos de coleta de forma que a distribuição destes valores se encontra distribuída segundo a figura 22. Observou-se por meio da figura que o valor característico de IAF da vegetação no sítio experimental foi de $4,14 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$.

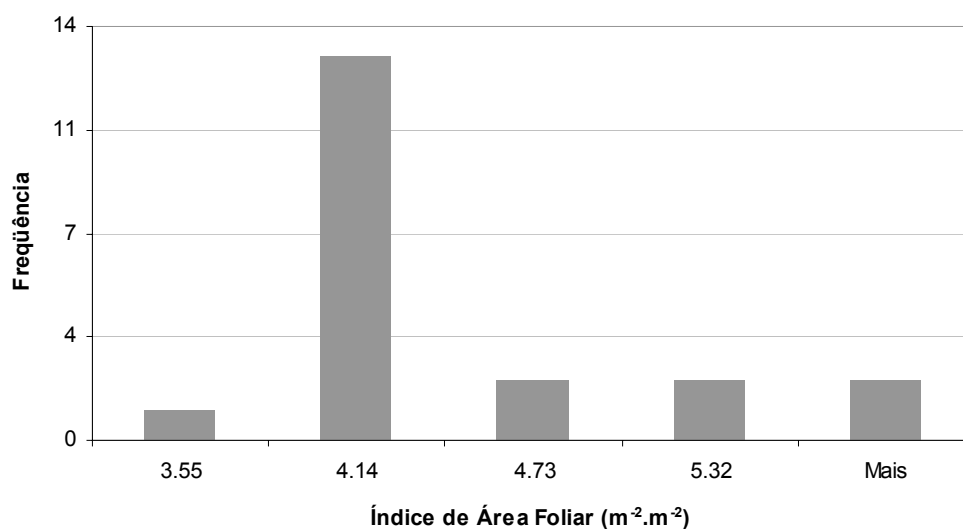


Figura 22 – Histograma da distribuição de valores de IAF nas posições de coleta de liteira no sítio de estudo.

A tabela 4 apresenta as coordenadas (X, Y) em UTM e os valores de IAF estimados para cone angular de 60° (LAI 4 *ring*) e 75° (LAI 5 *ring*) calculados sobre a área ocupada por 4 e 5 anéis (figura 3) a partir do centro da fotografia. Esses valores se referem aos pontos de coleta de liteira mostrados na figura 21, e no ponto ocupado por uma torre secundária, aproximadamente 20 metros do ponto 11

mostrado na figura 20, em fotografias tomadas em 11/04/2004, respectivamente. Um dos possíveis fatores que afetam a estimativa de LAI, o efeito da inclinação, não pode ser considerado aqui, pois o sítio de estudos é aproximadamente plano. A inclinação é um fator que nem sempre é tomado em conta quando o observador está situado sobre cobertura vegetal densa, ou então porque se torna complicado analisar em termos de equipamentos fotográficos e programas computacionais associados. Ainda, pode-se facilmente demonstrar que a inclinação afeta fortemente a estimativa de LAI com lentes tipo ‘olho de peixe’ porque obstrui parte do hemisfério de referência (WALTER et al., 2000). No presente trabalho, esses dados obtidos em 4 e 5 anéis diferem quanto à área abrangida pela fotografia hemisférica, obtida através da equação (6), onde h é a altura do dossel, e θ , o ângulo de análise (60° ou 75°), sendo utilizados para a comparação com as imagens obtidas através de sensoriamento remoto aqueles calculados sobre 4 anéis, por apresentarem menor interferência periférica devido ao ângulo do cone de visada ser menor.

Os valores de IAF para os 20 pontos de coleta de liteira para os ângulos de 60° e 75° variaram entre 3,55 a 5,91 $\text{m}^2 \text{m}^{-2}$, e 3,45 a 5,99 $\text{m}^2 \text{m}^{-2}$, respectivamente. Os valores médios para os ângulos de 60° e 75° foram de $4,213 \pm 0,67$ e $4,262 \pm 0,65$ $\text{m}^2 \text{m}^{-2}$, respectivamente. Valores comuns de IAF para a floresta amazônica se situam entre 4 e 5,5.

Tabela 4 – Valores de área foliar nos pontos de coleta de liteira, calculados pelo software GLA, em 60° (LAI 4 *ring*) e 75° (LAI 5 *ring*).

Ponto Liteira	X (m)	Y (m)	LAI 4Ring	LAI 5Ring
S1	682844	8737976	3,86	3,79
S2	682827	8737989	3,66	3,70
S3	682811	8738009	3,55	3,45
S4	682800	8738026	3,74	4,12
S5	682836	8737963	4,07	3,89
S6	682820	8737987	4,49	4,68
S7	682806	8737992	5,50	5,99
S8	682792	8737999	3,97	3,84
S9	682833	8737955	3,83	4,30
S10	682808	8737974	4,25	4,06
S11	682788	8737976	3,90	4,62
S12	682763	8737988	3,61	3,93
S13	682819	8737940	4,12	4,05
S14	682800	8737945	4,14	3,90
S15	682767	8737973	3,64	3,91
S16	682752	8737985	3,78	3,94
S17	682799	8737916	5,14	4,92
S18	682785	8737930	4,03	3,83
S19	682761	8737938	5,07	4,76
S20	682757	8737953	5,91	5,56
Obs.: coordenadas UTM WGS-84 zona 21L				

A tabela 5 apresenta as coordenadas (X, Y) em UTM e os valores de IAF estimados para cone angular de 60° (LAI 4 *ring*) e 75° (LAI 5 *ring*) de fotografias tomadas no dia 11/04/2004 nos pontos do arranjo de amostragem. Os valores mínimos e máximos para o ângulo de 60° e 75° foram de 3,55 e 3,51 $\text{m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$, e 5,45 e 5,44 $\text{m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$, respectivamente. Os valores médios para um ângulo de 60° e 75° foram de $4,36 \pm 0,54$ e $4,30 \pm 0,58 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$, respectivamente.

Tabela 5 – Valores de área foliar nos pontos do arranjo de amostragem calculados pelo software GLA, em 60° (LAI 4 *ring*) e 75° (LAI 5 *ring*).

Pontos do arranjo	X (m)	Y (m)	LAI 4Ring	LAI 5Ring
1	682756,8	8738056,3	4,13	3,95
2	682730,6	8738026,1	4,14	3,96
3	682704,3	8737995,9	3,68	3,67
4	682678,1	8737965,7	4,05	4,26
5	682783,1	8738086,4	4,33	4,15
6	682726,6	8738082,5	3,6	3,59
7	682700,4	8738052,3	3,55	3,51
8	682674,1	8738022,1	5,38	5,41
9	682647,9	8737992,0	4,61	3,88
10	682752,9	8738112,7	3,71	3,61
11	682696,5	8738108,8	4,82	5,09
12	682666,3	8738135,0	4,38	4,50
13	682636,1	8738161,3	5,45	5,44
14	682605,9	8738187,5	4,43	4,36
15	682575,7	8738213,8	4,67	4,87
16	682545,6	8738240,0	4,76	4,37
17	682515,4	8738266,3	4,04	4,01
18	682485,2	8738292,5	4,97	4,83
19	682455,0	8738318,8	4,16	4,13
20	682424,8	8738345,0	4,32	4,47

4.2 ESTIMATIVA DO NDVI

4.2.1. Variação Temporal da Radiação Fotossinteticamente Ativa Refletida

Foi realizado um estudo para verificar a correlação entre valores obtidos da PARr em dois pontos localizados no sítio experimental distantes aproximadamente 10 km. Um ponto é a torre de coleta de dados micrometeorológicos e outro uma árvore suporte, da espécie castanheira (*Bertholetia excelsa*), como suporte para um sensor PAR-Lite, onde foi instalado a 42 m de altura, aproximadamente 5 m acima da canóia. Esse sensor, instalado com o auxílio de técnicas de escalada em árvores, coletou dados da PARr no mês de julho de 2002. A figura 23 apresenta a correlação entre os dados coletados pelos sensores na torre e na árvore suporte castanheira, onde se verificou que os valores PAR, medidos entre os diferentes pontos, foram positivamente correlacionados.

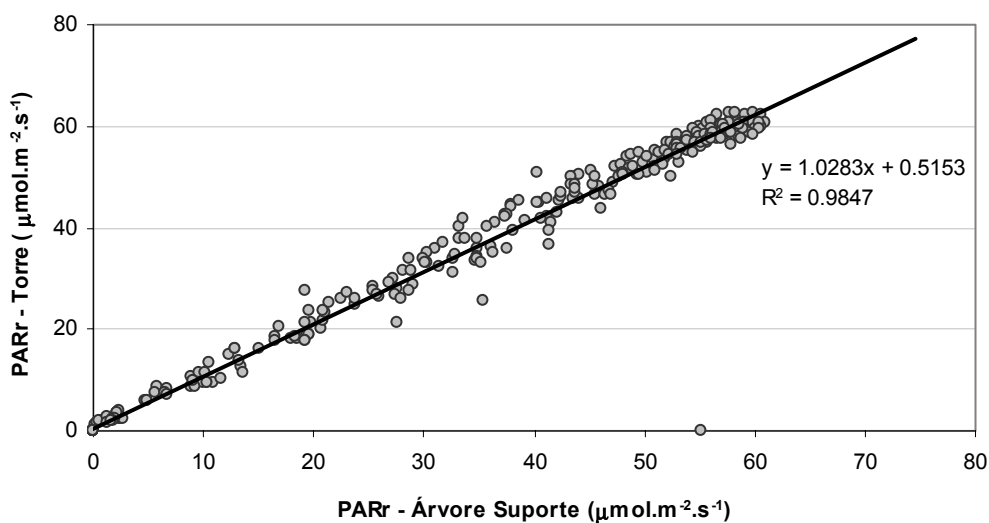


Figura 23 – Variação temporal da PARr na torre meteorológica e na árvore suporte *Bertholetia excelsa*.

4.2.2. Cálculo e resultados do NDVI

O NDVI foi calculado a partir dos valores digitais dos pixels das imagens corrigidos e transformados em valores de reflectância efetuando-se então a operação contida na equação (3). Utilizou-se para isso um software para manipulação de imagens obtidas por sensoriamento remoto. As imagens mostradas na figura 24 representam os valores de IPVI, que representa o NDVI entre 0 e 1, obtidas a partir da equação (4).

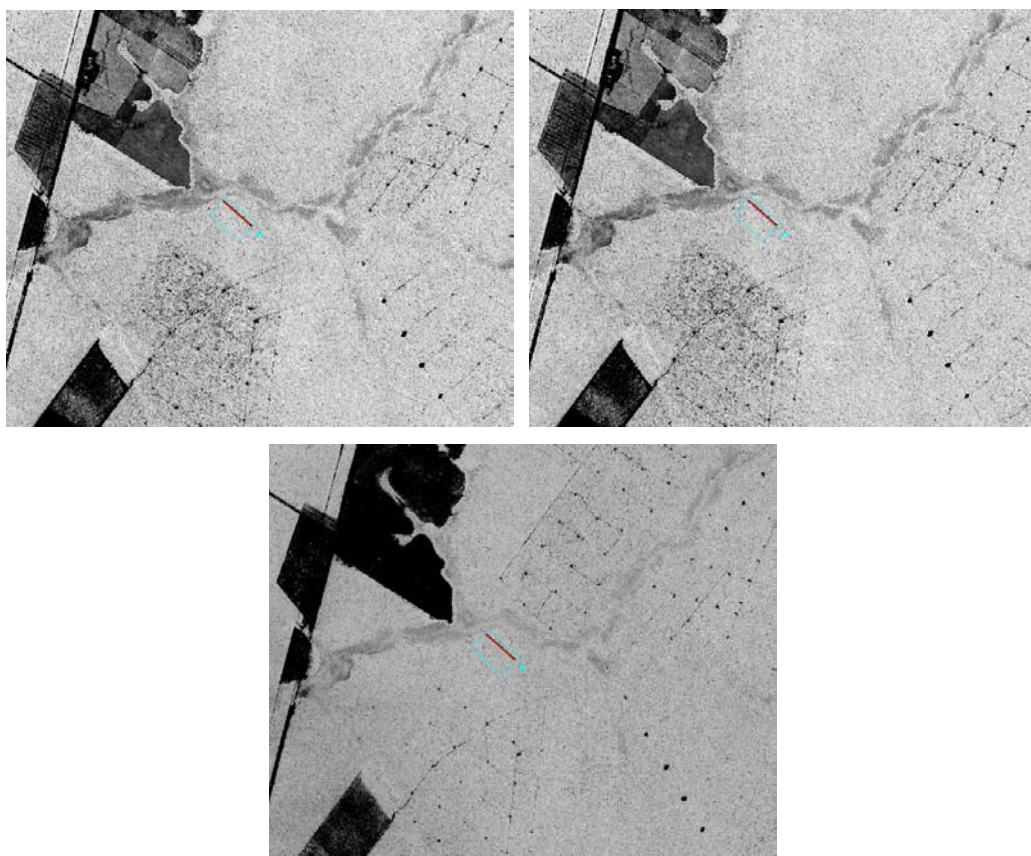


Figura 24 – IPVI das imagens IKONOS em 2000, 2001 e 2002.

A tabela 6 mostra os valores encontrados de NDVI e IPVI na imagem nas posições dos pontos de coleta de dados. Esses pontos foram lidos diretamente na imagem transformada, utilizando-se uma média dos valores vizinhos quando a posição dos pontos amostrados não se ajustava ao centro dos pixels.

Tabela 6 – Valores de NDVI e IPVI para os pontos amostrados.

Pontos	IPVI	NDVI
S1	0,91399	0,82798
S2	0,90597	0,81194
S3	0,92808	0,85616
S4	0,91235	0,82470
S5	0,92488	0,84976
S6	0,90307	0,80614
S7	0,91917	0,83834
S8	0,91467	0,82934
S9	0,91675	0,83350
S10	0,92550	0,85100
S11	0,92122	0,84244
S12	0,90924	0,81848
S13	0,93033	0,86066
S14	0,90944	0,81888
S15	0,91754	0,83508
S16	0,92087	0,84174
S17	0,91462	0,82924
S18	0,92378	0,84756
S19	0,92613	0,85226
S20	0,90664	0,81328
Torre secundária	0,92714	0,85428

4.3 CORRELAÇÃO ENTRE IAF E NDVI

Os valores estimados pelas fotografias hemisféricas não devem ser considerados como mais confiáveis por diversas razões. Entre elas, porque estes valores são resultados instantâneos tomados em campo e porque é preciso uma técnica de análise de imagens (WALTER et al., 2000). Entretanto, fotografias hemisféricas têm sido utilizadas em estudos de florestas, e a técnica pode ser importante para obtenção de índices de vegetação a partir do sensoriamento remoto.

No presente trabalho buscou-se correlacionar os valores estimados de IAF pelas fotografias hemisféricas e os valores médios de IPVI obtidos através das imagens IKONOS, em um período de transição úmido-seco. A tabela 7 apresenta os resultados da regressão entre os valores de IAF e os valores médios de IPVI.

GASTELLU-ETCHEGORRY et al. (1998) verificaram que houve um aumento de NDVI com o aumento da LAI em todas as direções.

HONZÁK et al. (1996) mencionam autores que consideram que um número de estudos precedente relacionou dados obtidos por sensoriamento às propriedades medidas de florestas tropicais, embora muitos não fossem concluídos, particularmente ao usar os dados adquiridos por sensores satélite óticos. Isto é em parte porque somente a reflectância espectral das camadas superiores do dossel é detectada por tais sensores. Por essa razão as relações diretas entre biomassa da floresta e dados de reflectância do sensoriamento remoto não podem ser esperados.

A figura 25 apresenta os dados de IAF tomados de fotografias nos pontos de liteira e IPVI (imagem IKONOS de 2002). Observou-se pela figura que não houve significativa correlação entre os dados.

Tabela 7 – Resultados da regressão entre fotografias hemisféricas e valores médios de IPVI.

Pontos	LAI 4Ring	LAI 5Ring	IPVI
S1	3,86	3,79	0,91399
S2	3,66	3,70	0,90597
S3	3,55	3,45	0,92808
S4	3,74	4,12	0,91235
S5	4,07	3,89	0,92488
S6	4,49	4,68	0,90307
S7	5,50	5,99	0,91917
S8	3,97	3,84	0,91467
S9	3,83	4,30	0,91675
S10	4,25	4,06	0,92550
S11	3,90	4,62	0,92122
S12	3,61	3,93	0,90924
S13	4,12	4,05	0,93033
S14	4,14	3,90	0,90944
S15	3,64	3,91	0,91754
S16	3,78	3,94	0,92087
S17	5,14	4,92	0,91462
S18	4,03	3,83	0,92378
S19	5,07	4,76	0,92613
S20	5,91	5,56	0,90664
Torre secundária	4,00	4,80	0,92714
<i>Estatística de regressão</i>			
R múltiplo	0,131138263		
R-Quadrado	0,017197244		
R-quadrado ajustado	-0,034529217		
Erro padrão	0,666814918		
Observações	21		

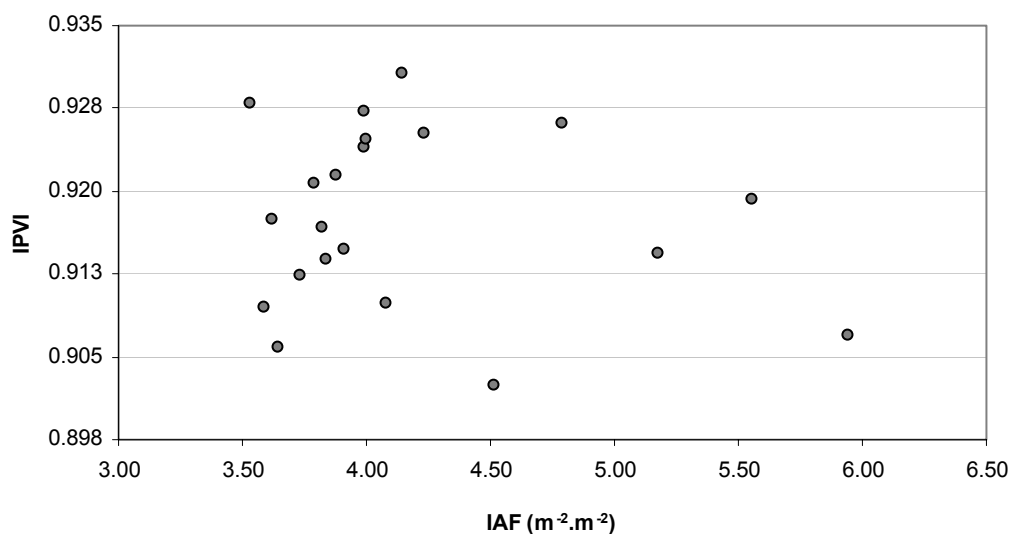


Figura 25 – Correlação entre IPVI (imagem IKONOS de 2002) e Índice de Área Foliar.

Não havendo correlação estatística significativa entre os índices obtidos por imagens IKONOS ou Landsat, optou-se por um procedimento de correção, utilizando-se a banda 7 - *mid infrared* para LANDSAT, de valores do NDVI que os transforma em números próximos dos valores de IAF, apresentados na tabela 8. O novo índice é chamado NDVI_c (11) e foi introduzido por MENANI (1993). Também não houve correlação estatística significante com o uso de NDVI_c (figura 26).

$$NDVI_c = \frac{NIR - RED}{NIR + RED} \times \left(1 - \frac{MIR - MIR_{\min}}{MIR_{\max} - MIR_{\min}} \right), \quad (11)$$

Onde:

MIR: Reflectância do infravermelho médio,

MIR_{max}: Reflectância do infravermelho médio mínima (vegetação fechada),

MIR_{min}: Reflectância do infravermelho médio máxima (vegetação aberta).

Tabela 8 – Resultados da regressão entre fotografias hemisféricas e valores médios de IPVI, NDVI e NDVI corrigido, obtidos de imagem LANDSAT.

pto	x	y	LAI 4Ring	LAI 5Ring	IPVI LANDSAT	NDVI LANDSAT	NDVICOR
1	682756,8	8738056,3	4,13	3,95	0,6049	0,2099	5,5425
2	682730,6	8738026,1	4,14	3,96	0,6037	0,2075	4,9876
3	682704,3	8737995,9	3,68	3,67	0,6116	0,2231	5,277
4	682678,1	8737965,7	4,05	4,26	0,6096	0,2192	5,4485
5	682783,1	8738086,4	4,33	4,15	0,6052	0,2103	5,23
6	682726,6	8738082,5	3,6	3,59	0,6106	0,2212	5,0567
7	682700,4	8738052,3	3,55	3,51	0,6059	0,2118	5,1821
8	682674,1	8738022,1	5,38	5,41	0,6136	0,2271	5,1772
9	682647,9	8737992,0	4,61	3,88	0,6097	0,2195	5,5111
10	682752,9	8738112,7	3,71	3,61	0,6116	0,2231	5,3472
11	682696,5	8738108,8	4,82	5,09	0,6004	0,2007	5,2231
12	682666,3	8738135,0	4,38	4,5	0,6035	0,2071	5,0418
13	682636,1	8738161,3	5,45	5,44	0,5968	0,1936	5,0128
14	682605,9	8738187,5	4,43	4,36	0,5989	0,1978	5,0258
15	682575,7	8738213,8	4,67	4,87	0,6023	0,2045	5,2764
16	682545,6	8738240,0	4,76	4,37	0,6089	0,2179	5,2563
17	682515,4	8738266,3	4,04	4,01	0,6057	0,2115	5,247
18	682485,2	8738292,5	4,97	4,83	0,6097	0,2193	5,2152
19	682455,0	8738318,8	4,16	4,13	0,6145	0,2291	5,119
20	682424,8	8738345,0	4,32	4,47	0,6059	0,2118	5,2961

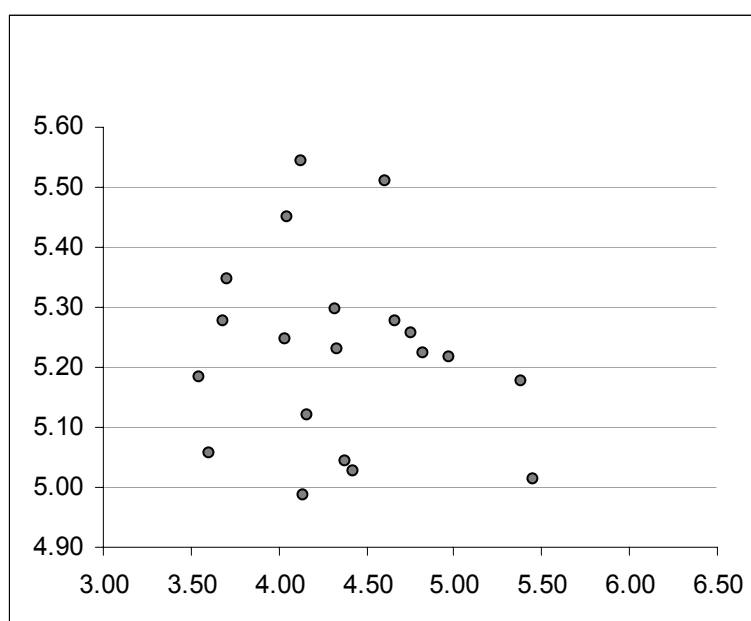


Figura 26 – Correlação entre IAF e NDVI corrigido (imagem Landsat de 2000).

A tabela 9 apresenta os valores de IAF, IPVI e a sua média por reamostragem aleatória com reposição nos pontos de liteira e torre secundária. Por meio do teste Wilmott (1982). Os valores encontrados não apresentaram significativa correlação, sendo o índice de concordância $d = 0,0032$. Essa falta de correlação talvez seja devido a pouca precisão no georreferenciamento dos pontos de coleta de liteira e ao efeito da sazonalidade sobre a variação dos índices.

Tabela 9 – Valores de IAF, IPVI e a sua média por reamostragem aleatória com reposição nos pontos de liteira e torre secundária.

Pontos	IAF	IPVI	IPVI média de pixels re-amostrada
S1	3,86000	0,91399	0,91406
S2	3,66000	0,90597	0,90614
S3	3,55000	0,92808	0,92829
S4	3,74000	0,91235	0,91237
S5	4,07000	0,92488	0,92500
S6	4,49000	0,90307	0,90342
S7	5,50000	0,91917	0,91948
S8	3,97000	0,91467	0,91471
S9	3,83000	0,91675	0,91692
S10	4,25000	0,92550	0,92551
S11	3,90000	0,92122	0,92131
S12	3,61000	0,90924	0,90916
S13	4,12000	0,93033	0,93033
S14	4,14000	0,90944	0,90967
S15	3,64000	0,91754	0,91746
S16	3,78000	0,92087	0,92096
S17	5,14000	0,91462	0,91457
S18	4,03000	0,92378	0,92381
S19	5,07000	0,92613	0,92659
S20	5,91000	0,90664	0,90656
Torre secundária	4,00000	0,92714	0,92701

4.4 DINÂMICA DO MANEJO SELETIVO

Empregou-se o IPVI para se avaliar a diferença entre as imagens IKONOS entre 2001-2000, 2002-2001, e 2002-2000 de diferentes datas, em mesmo período de transição úmido-seco, revelando alguns efeitos da exploração seletiva através de desmatamentos de manejos florestais. A figura 27 apresenta estas diferenças entre imagens IPVI. Valores em vermelho indicam um decréscimo maior que 10%, valores em verde acusam um acréscimo maior que 10%.

As imagens geradas a partir das diferenças entre índices de vegetação (IPVI) mostraram que no período de 2000 a 2001 houve um incremento de vegetação em áreas de manejo florestal e um decréscimo em áreas desmatadas, enquanto que no período de 2001 a 2002 mostrou novas áreas exploradas. Pode-se constatar que as áreas em que houve exploração através de manejo florestal apresentou elevado incremento de biomassa em intervalos de tempo de um ano, demonstrando grande capacidade de regeneração considerando-se que os ciclos de corte em florestas nativas podem ser superiores a 20 anos.

Outro fator a ser considerado foi que o aumento de biomassa verificado na imagem apresentada na figura 24(a) possivelmente possa ter ocorrido devido ao período úmido-seco que favorece o crescimento da vegetação ocasionado pela ocorrência de chuvas.

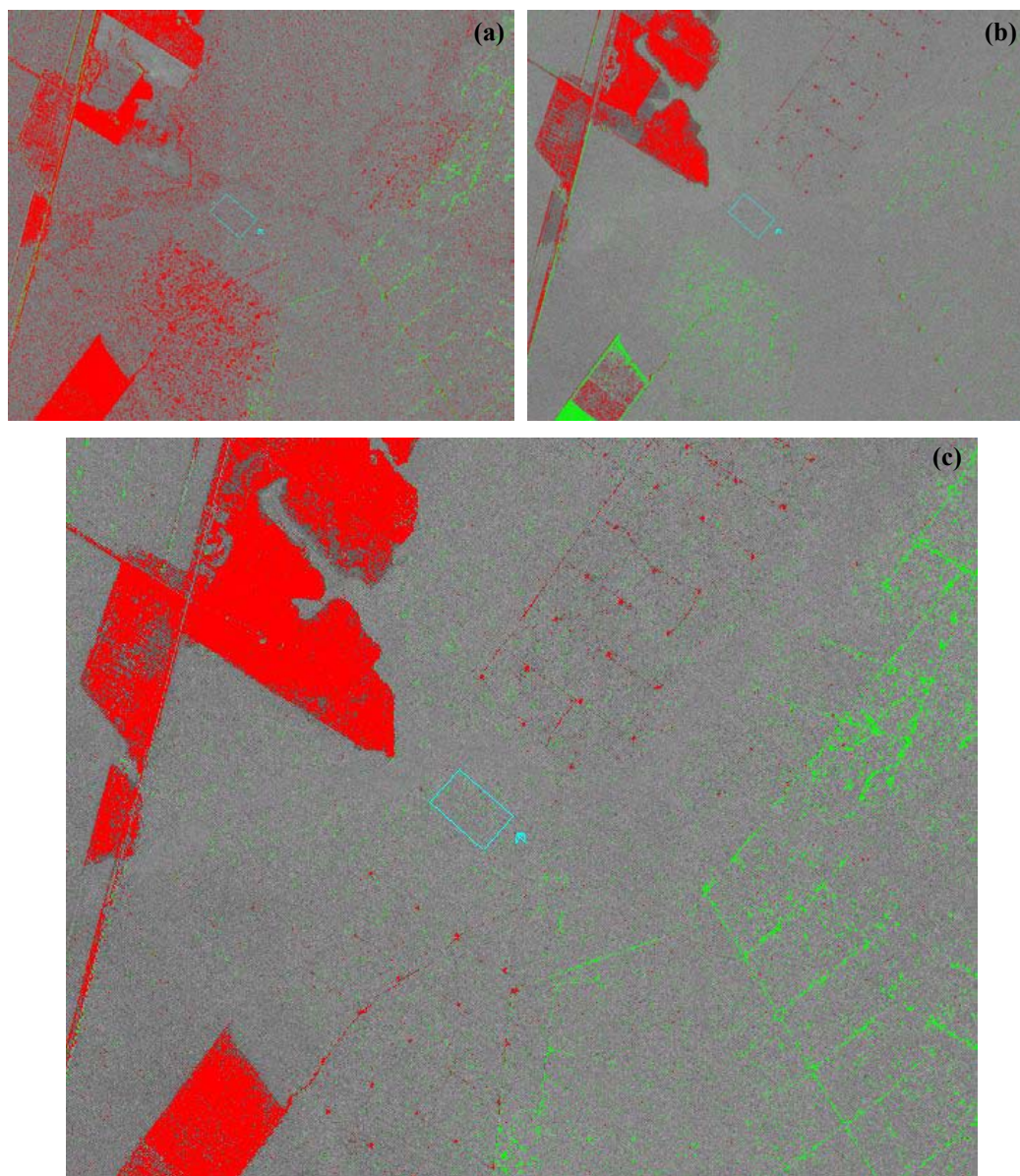


Figura 27 – Diferença entre imagens IPVI. (a) Diferenças entre 2001-2000, (b) Diferenças entre 2002-2001, (c) Diferenças entre 2002-2000. Em azul estão indicadas a área de estudos e a posição da torre de coleta de dados.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir das discussões dos resultados obtidos, considera-se que:

- A estimativa do índice de área foliar, num ângulo de análise de 60° para 20 pontos situados num arranjo ao longo do transecto e 20 pontos de coleta de liteira foram em média $4,36 \pm 0,54$ e $4,21 \pm 0,67$, respectivamente.
- Os valores estimados de IPVI e NDVI a partir das imagens IKONOS nos pontos de coleta de liteira, foram de 0,903 a 0,930 e 0,811 a 0,861, respectivamente.
- Ao correlacionar os valores estimados de IAF pelas fotografias hemisféricas e os valores médios de IPVI obtidos por meio das imagens IKONOS, não foi obtida uma correlação significativa. A princípio houve a suspeita de que o fato provavelmente foi devido a um georreferenciamento dos pontos de coleta de liteira de precisão insuficiente. Esses pontos tiveram suas posições coletadas por meio de GPS, que tem sua precisão diminuída em zona florestada. Esperava-se conseguir melhores resultados com o uso de técnicas topográficas que localizem os pontos a partir da torre de coleta de dados micro meteorológicos e que adicionem os pontos da matriz proposta. Entretanto, apesar desses erros, deveria haver uma correlação maior pois certo erro poderia ser absorvido uma vez que as fotografias abrangiam uma área de aproximadamente 4000 m². Além disso, os pontos que foram amostrados no *grid* proposto, locado topograficamente e de georreferenciamento com precisão supostamente superior também não obtiveram correlação significativa. Foi efetuada então a aplicação da regressão dos pontos de valores de LAI aplicados à imagem Landsat. Estudos aplicados à cultura de eucaliptos mostram que, no que diz respeito à floresta tropical, a correlação entre IAF/NDVI não é significativa, podendo apresentar melhores correlações quando diferentes formações vegetais se encontram no banco de dados (como a faixa de mata ciliar que poderia ter sido incluída). Alguns autores encontraram a solução fazendo um NDVI corrigido com a banda 7 (*mid infrared*). Dessa forma, os valores de NDVI ficam próximos aos de área foliar, em

torno de 4-5, apresentando valores que variam na mesma proporção da LAI e que, para certas condições e no caso de cultura de eucaliptos podem produzir um r^2 de 0,98, MEGOWN (2004). Usando-se esse procedimento para imagens de 1999 e 2002 ainda não foi encontrada correlação para os dados apresentados nesse estudo. A sazonalidade aparenta ser um fator crítico. Além disso, a grande defasagem temporal entre dados coletados e imagens analisadas oferece margem para uma fraca correlação. A heterogeneidade de espécies na floresta tropical torna os valores de LAI variados desuniformemente ao longo do tempo, de forma bastante diferente de uma plantação de eucaliptos. A partir do segundo semestre de 2004, com a tomada regular de fotos, outros estudos poderão verificar esse comportamento. A tomada de fotografias hemisféricas também não precisa ser feita pontualmente, a adoção de uma média dentro de um quadro de quatro fotos por ponto diminuiria os erros devidos a condições particulares daquele ponto em especial, como a proximidade de grandes árvores, ou folhagens próximas à lente. Assim as causas da baixa correlação podem ter sido devido à variação espacial da LAI ser heterogenia graças à alta diversidade de espécies e seu comportamento sazonal, o que em comparações defasadas pode gerar grandes discrepâncias entre fotografias hemisféricas e valores de NDVI. Os efeitos da sazonalidade e inter-anualidade devem ser mais estudados com uma melhor amostragem espacial e temporal. A fig. 19 mostra correlação bastante grande entre os valores de PARr de dois pontos com espécies que realmente se correlacionam naquele período. A castanheira (*Bertholetia excelsa*), dominante no ponto 1 se correlaciona naquela figura com uma composição de *Qualea paraensis*, *Parkia pendula*, e *Brosimum* sp, no ponto 2 (ocupado pela torre-suporte) num período curto de tempo (30 dias). Essa correlação pode se deteriorar ao longo do ano, quando ocorrer a farta floração da *Qualea Paraensis* (figura 6), por exemplo.

- O emprego do uso da diferença entre IPVI ou NDVI, obtido por meio de imagens de satélite para o acompanhamento qualitativo da dinâmica do manejo seletivo seja adequado para verificação de mudanças inter-anuais em uma região. A adição de dados de produção de madeira por transecto obtidos do controle da empresa madeireira poderia possibilitar uma aproximação quantitativa do manejo através de séries temporais de imagens.

- Estudos futuros podem utilizar material atualizado com menores custos, aplicando as imagens do novo sistema CBERS, e obter novos dados para correção atmosférica de forma simultânea. Ou ainda utilizando material pré-processado, como as imagens e produtos MODIS, de forma a contornar, de certo modo, o problema da correção atmosférica.

BIBLIOGRAFIA

ASNER, G. P.; BRASWELL, B., H.; WESSMAN, C. A. Ecological Research Needs from Multi-Angle Remotely Sensed Data. **Remote Sensing of Environment**. v. 63, p. 155-165, 1998a.

ASNER, G. P.; WESSMAN, C. A.; SCHIMEL, D. S.; ARCHER, S. Variability in Leaf and Litter Optical Properties: Implications for BRDF Model Inversions Using AVHRR, MODIS, and MISR. **Remote Sensing of Environment**. v. 63, p. 243-257, 1998b.

BARTLETT, D. S.: et al. Use of Vegetation Indices to Estimate Intercepted Solar Radiation and Net Carbon Dioxide Exchange of a Grass Canopy. **Remote Sensing of Environment**. v. 30, p. 115-128, 1990.

BIRKETT, C. M.; MERTES, L. A. K.; DUNNE, T.; COSTA, M. H.; JASINSKI, M. J. Surface water dynamics in the Amazon Basin: Application of satellite radar altimetry. **J. Geophys. Res.** v. 107 (D20), 8059.

CUNHA, E.; R.; S.; P. da. Integração Digital de Imagens de Radar e Landsat – TM com Dados Geológicos e Aerogamaespectrométricos no auxílio ao mapeamento geológico da região do Complexo Granítico Estrela – Pará (PA). Dissertação de Mestrado em Sensoriamento Remoto. Instituto de Nacional de Pesquisas Espaciais. São José dos Campos – SP. 2003. 147p.

FRAZER, G. W.; CANHAM, C. D.; LERTZMAN, K. P. Gap Light Analyzer (*GLA*), *Version 2.0: Imaging software to extract canopy structure and gap light transmission indices from true-colour fisheye photographs, users manual and program documentation*. Copyright © 1999: Simon Fraser University, Burnaby, British Columbia, and the Institute of Ecosystem Studies, Millbrook, New York. 1999.

GAMON, J. A.; et al. Relationship between NDVI, Canopy Structure, and Photosynthesis in three Californian Vegetation Types. **Ecological Applications**. v. 5, p. 28-41, 1995.

GAO, B. C.; GOETZ, A. F. H.; ZAMUDIO, J. A. Removing Atmospheric Effects from AVIRIS Data for Reflectance Retrievals. In: Proceeding of the Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer (AVIRIS) Workshop, JPL Public 93-26. p. 80-86, 1993.

GASTELLU-ETCHEGORRY, J., P.; TRICHON, V. A Modeling Approach of PAR Environment in a Tropical Rain Forest in Sumatra: Application to Remote Sensing. **Ecological Modelling**. v. 108, p. 237-264, 1998.

GOUDRIAN, J. The Bare-Bones of Leaf Angle Distribution in Radiation Models for Canopy Photosynthesis and Energy Exchange. **Agricultural and Forest Meteorology**. v. 43, p. 155-169, 1988.

HALL, F. G., et al. Large-Scale Patterns of Forest Succession as Determined by Remote Sensing. **Ecology**. v. 72, p. 628-640, 1991.

HALL, F. G., et al., 1995, *Remote Sensing of Forest Biophysical Structure Using Mixture Decomposition and Geometric Reflectance Models*, Ecological Applications, 5(4), pp. 993-1013.

HONZÁK, M.; LUCAS, R. M.; AMARAL, I. do; CURRAN, P. J.; FOODY, G. M.; AMARAL, S. Estimation of the Leaf Area Index and Total Biomass of Tropical Regenerating Forests: Comparison of Methodologies. p. 365-381. In: **Amazonian Deforestation and Climate**. John Wiley & Sons, Institute of Hydrology. p. 611, 1996.

HUEMMERICH, T. A.; et al. High Temporal Resolution NDVI Phenology from Micrometeorological Radiation Sensors. **Journal of Geophysical Research**. v. 104, n. D22, p. 27935-27944, 1999.

HURTT, G.; XIAO, X.; KELLER, M.; PALACE, M.; ASNER, G. P.; BRASWELL, R.; BRONDÍZIO, E.; 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, p. 111-127, 2003.

JENSEN, J. R., Remote Sensing of the Environment: An Earth Resource Perspective. Prentice-Hall, Inc., NJ, 2000.

JONCKHEERE, I.; FLECK, S.; NACKAERTS, K.; MUYS, B.; COPPIN, P.; WEISS, M.; BARET, F. Review of methods for in situ leaf area index determination Part I. Theories, sensors and hemispherical photography. **Agricultural and Forest Meteorology**. v. 121, p. 19-35, 2004.

KNYAZIKHIN, Y.; GLASSY J.; PRIVETTE, J. L.; TIAN, Y.; LOTSCH, A.; ZHANG, Y.; WANG Y.; MORISETTE, J. T.; VOTAVA, P.; MYNENI, R. B.; NEMANI, R. R.; RUNNING, S. W. MODIS Leaf Area Index (LAI) and Fraction of Photosynthetically Active Radiation Absorbed by Vegetation (FPAR) Product (MOD15) Algorithm Theoretical Basis, Document, 1999. Disponível em <http://eospsso.gsfc.nasa.gov/atbd/modistables.html>. Acessado em 04/04/2003.

KRIEGLER, F. J.; MALILA, W. A.; NALEPKA, R. F.; RICHARDSON, W. Preprocessing Transformations and Their Effects on Multispectral Recognition. In SIXTH INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON REMOTE SENSING OF ENVIRONMENT, 1969, University of Michigan, p. 97-131.

LANG, A. R. G. Simplified Estimate of Leaf Area Index from Transmittance of the Sun's Beam. **Agricultural and Forest Meteorology**. v. 41, 179-186, 1987.

LUCAS, R. M. et al. Avaliação da Composição Florística, Biomassa, e Estrutura de Florestas Tropicais em Regeneração: a Contribuição do Sensoriamento Remoto, Floresta Amazônica: Dinâmica Regeneração e Manejo, INPA, cap. 4, p. 61-82, 1998.

MALHI, Y.; BALDOCCHI, D. D.; JARVIS, P. G. The Carbon Balance of Tropical, Temperate, and Boreal Forests. **Plant Cell Environ.** v. 22, p. 715-740, 1999.

MARQUES, R., ZEILHOFER, P., SULI, G. S., SANTOS, E. S. dos. Estimativas Preliminares da Radiação PAR Refletida a Partir de Imagens Multitemporais do IKONOS. VI CONGRESSO BRASILEIRO DE GEÓGRAFOS, Goiânia – GO, 2004.

MCDANIEL, K. C.; HAAS, R. H. Assessing Mesquite-Grass Vegetation Condition from Landsat. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 48, n. 3, p. 441-450, 1986.

MEGOWN, R. A.; WEBSTER, M.; JACOBS, S. Using Landsat TM Imagery to Estimate LAI in a Eucalyptus Plantation
http://ffp.csir.co.za/research/RS_LAI_paper.pdf acessado em 16/12/2004, 2004.

MIRANDA, A. C.; LLOYD, J.; GRACE, J.; FRANCEY, R. J.; MACINTYRE, J. A.; MEIR, P.; RIGGAN, P.; LOCKWOOD, R.; BRASS, J. Fluxes of Carbon, Water and Energy over Brazilian Cerrado: an Analysis Using Eddy Covariance and Stable Isotopes. **Plant Cell Environ.** v. 20, p. 315-328, 1997.

MIRANDA, J. M. 2003. *Relação entre Fotossíntese e Potencial Hídrico para Diversas Espécies em uma Floresta de Transição*. CONGRESSO DE ECOLOGIA DO BRASIL, n. 6, Anais de Trabalhos Completos. Congresso de Ecologia do Brasil, Fortaleza, Editora da Universidade Federal do Ceará, 2003. p. 624-625.

MORAN, E. F.; BRONDIZIO, E. Integrating Amazonian Vegetation, Land-Use, and Satellite Data. **Bioscience**. v. 44, Issue 5, p. 329-339, 1994.

MORAN, E. F.; et al. Effects of Soil Fertility and Land-Use on Forest Succession in Amazônia. **Forest Ecology and Management**. v. 139, p. 93-108, 2000.

NOGUEIRA, R.; N.; SILVEIRA, R. J. C.; PEREIRA, R. S. Georreferenciamento de Mapas Temáticos e Imagens de Satélite no Aplicativo IDRISI. Ver. Brás. de Agrociência. v. 3, n. 3, p. 99-106, 1997.

OECHEL, W. C.; et al. A Scaling Approach for Quantifying the Net CO₂ Flux of the Kuparuk River Basin, Alaska. **Global Change Biology**, 6 (Suppl. 1), p. 160-173, 2000.

PEREIRA, A. R.; ANGELOCCI, L. R.; SENTELHAS, P. C. **Agrometeorologia – Fundamentos e Aplicações Práticas**. Livraria e Editora Agropecuária Ltda. 2002.

RAHMAN, H.; DIDIEU, G. SMAC: a Simplified Method for the Atmospheric Correction of Satellite Measurements in the Solar Spectrum. **Int. J. Remote Sensing**. v. 15, n. 1, p. 123-143, 1994.

RATTER, J. A. Transitions between Cerrado and forest vegetation in Brazil, Nature and Dynamics of Forest-Savanna Boundaries, Chapman and Hall, New York, p. 417-430. 1992.

RAVEN, P. H.; EVERT, R. F.; EICHHORN, S.E. Biology of Plants, W. H. Freeman and Company, New York, p. 124-149. 1971.

RUNNING, S.; BALDOCCHI, D.; TURNER, D.; GOWER, S.; BAKWIN, P.; HIBBARD, K. A Global terrestrial Monitoring Network Integrating Tower Fluxes, Flask Sampling, Ecosystem Modeling and EOS Data. **Remote Sensing of Environment**. v. 70, p. 108-127, 1999.

SABINS, F. F. **Remote Sensing – Principles and Interpretation**. 3rd Edition. W. H. Freeman and Company. 1996.

SELLERS, P. J. Canopy Reflectance, Photosynthesis and Transpiration. **Int. Remote Sensing**. v. 6, n.8, p. 1335-1372, 1985.

SELLERS, P. J. Canopy Reflectance, Photosynthesis and Transpiration. II. The Role of Biophysics in the Linearity of Their Independence. **Remote Sensing of Environment**. v. 21, p. 143-183. 1987.

SELLERS, P. J., et al. Modeling the Exchanges of Energy, Water and Carbon between Continents and the Atmosphere. **Science**. v. 275, p. 502-509, 1997.

SHALINA, E. V., et al. Unit for atmospheric correction of satellite imagery in the GIS framework. **Earth Observation and Remote Sensing**, v. 13, p. 587-597, 1996.

SULI, G. S., SILVEIRA, M.; YOSHITAKE, N. M.; PRIANTE FILHO, N.; VOURLITIS, G. L.; SANTOS, V. A. dos; 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, 2003, Fortaleza. Anais. Fortaleza – CE, 2003. p. 66-68.

TANNER, E. V. J.; KAPOV, V.; ADAMS, J. 1996, *Relationship Between Atmospheric CO₂ Variations and a Satellite-derived Vegetation Index*, Dynamics of

Tropical Communities – The 37th Symposium of the British Ecological Society - Cambridge University, Blackwell Science, vol. 37, pp. 599-615.

TER STEEGE, H.; PITMAN, N.; SABATIER, D.; CASTELLANOS, H.; VAN DER HOUT, P.; DALY, D. C.; SILVEIRA, M.; PHILLIPS, O.; VASQUEZ, R.; VAN ANDEL, T.; DUIVENVOORDEN, J.; OLIVEIRA, A. A.; EK, R.; LILWAH, R.; THOMAS, R.; VAN ESSEN, J.; BAIDER, C.; MAAS, P.; MORI, S.; TERBORGH, J.; VARGAS, P.N.; MOGOLLÓN, H.; MORAWETZ, W. A spatial model of tree α -diversity and density for the Amazon, *in press*.

TIAN, Y.; WANG, Y.; ZHANG, Y.; KNYAZIKHIN, Y.; BOGAERT, J.; MYNENI, R. B. Radiative Transfer Based Scaling of LAI Retrievals from Reflectance Data of Different Resolutions. **Remote Sensing of Environment**. v. 84, p. 143-159, 2002.

TIAN, Y.; WOODCOCK, C. E.; WANG, Y.; SHABANOV, N. V.; ZHOU, L.; ZHANG, Y.; BUERMANN, W.; DONG, J.; VEIKKANEN, B.; HÄME, T.; ANDERSSON, K.; OZDOGAN, M.; KNYAZIKHIN, Y.; MYNENI, R. B. Multiscale Analysis and Validation of the MODIS LAI Product I. Uncertainty Assesment. **Remote Sensing of Environment**. v. 83, p. 414-430, 2002.

TIAN, Y.; WOODCOCK, C. E.; WANG, Y.; SHABANOV, N.V.; ZHOU, L.; ZHANG, Y.; BUERMANN, W.; DONG, J.; VEIKKANEN, B.; HÄME, T.; ANDERSSON, K.; OZDOGAN, M.; KNYAZIKHIN, Y.; MYNENI, R. B.; Multiscale Analysis and Validation of the MODIS LAI Product II. Sampling Strategy. **Remote Sensing of Environment**. v. 83, p. 431-441, 2002.

TUCKER, C. J., et al., Relationship Between Atmospheric CO₂ Variations and a Satellite-Derived Vegetation Index. **Nature**. v. 319, p. 195-199, 1986.

VERMOTE, E. F.; TANRE, D.; DEUZÉ, J. L.; HERMAN, M.; MORCRETTE, J. J. Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum, 6S: An Overview. IEEE Trans. **Geosc. Remote Sens**. v. 35, n. 3, p.675-686, 1997.

VILLALOBOS, F. J.; ORGAZ, F.; MATEOS, L. on-Destructive Measurement of Leaf Area in Olive (*Olea europaea* L.) Trees Using a Gap Inversion Method. **Agricultural and Forest Meteorology**. v. 73, p. 29-42, 1995.

VOURLITIS, G. L.; PRIANTE FILHO, N.; HAYASHI, M. M. S.; NOGUEIRA, J. S.; CASEIRO, F. T.; CAMPLO JR., J. H. Seasonal Variations in the Evapotranspiration of a Transitional Tropical Forest of Mato Grosso, Brazil. **Water Resources Research**. v. 38, n. 6, p. 30-1-30-11, 2002.

XIONG, X.; BARNES, W. L.; GUENTHER, B.; MURPHY, R. E. Lessons Learned from Modis. **Adv. Space Res**. vol. 32, n. 11, p. 2107-2112, 2003.

WALTER, J. M. N.; TORQUEBIAU, E. F. The Computation of Forest Leaf Area Index on Slope using Fish-Eye Sensors. **Life Sciences**. v. 323, p. 801-813, 2000.

WENTZ, F. J.; SCHABEL, M. Precise Climate Monitoring Using Complementary Satellite Data Sets. **Nature**. v. 403, p. 414-416, 2000.

WHITFORD, K. R.; COLQUHOUN, I. J.; LANG, A. R. G.; HARPER, B. M. Measuring Leaf Area Index in a Sparse Eucalypt Forest: a Comparison of Estimates from Direct Measurement, Hemispherical Photography, Sunlight Transmittance and Allometric Regression. **Agricultural and Forest Meteorology**. v. 74, p. 237-249, 1995.

WHITING, G. J., et al. Biosphere/Atmosphere CO₂ Exchange in Tundra Ecosystems: Community Characteristics and Relationships with Multispectral Surface Reflectance. **Journal of Geophysical Research**. v. 97, n. D15, p. 16671-16680, 1992.

WILLMOTT, C. J. Some Comments on the Evaluation of Model Performance. **Bulletin American Meteorological Society**. v. 63, n. 11, p.1309-1313, 1982.

Programas

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

ATREM. In: GAO, B. C.; HEIDEBRECHT, K. B.; GOETZ, A. F. H.; 1999. *ATREM – Atmosphere Removal Program Version 3.1 User's Guide*.

Clark Labs

Copyright © 1987-2003

Gap Light Analyzer. In FRAZER, G. W.; CANHAM, C. D.; LERTZMAN, K. P. Gap Light Analyzer (GLA), Version 2.0: *Imaging software to extract canopy structure and gap light transmission indices from true-colour fisheye photographs, users manual and program documentation*. Copyright © 1999: Simon Fraser University, Burnaby, British Columbia, and the Institute of Ecosystem Studies, Millbrook, New York. 1999.

IDRISI 14.01 (Kilimanjaro)

Resampling Software (Resampling Stats, Inc)

SMAC. In RAHMAN, H.; DIDIEU, G. SMAC: a simplified method for the atmospheric correction of satellite measurements in the solar spectrum. **Int. J. Remote Sensing**, vol. 15, n. 1, p. 123-143, 1994.

SPRING. In CAMARA, G.; SOUZA, R. C. M.; FREITAS, U. M.; GARRIDO, J. SPRING: Integrating remote sensing and GIS by object-oriented data modeling. **Computers & Graphics**. v. 20, n. 3, p. 395-403, 1996.

Manuais

Instruction Manual PAR LITE ; Sci-Tec Instruments Kipp & Zonen

Anexo 1

PROCEDIMENTOS PARA CORREÇÃO ATMOSFÉRICA DE IMAGENS DOS SATÉLITES IKONOS E LANDSAT TM+

Aspectos relevantes da metodologia para a correção atmosférica, de imagens geradas pelo sensor IKONOS.

1. Calibração Radiométrica

A calibração das imagens segue a fórmula encontrada na documentação das imagens adquiridas pelo programa Experimento de Grande Escala da Biosfera-Atmosfera da Amazônia (LBA),

$$L_{i,j,k} = DN_{i,j,k} [CalCoefk]^{-1} \quad (12)$$

Onde:

i,j,k = coordenadas matriciais do pixel i,j da imagem IKONOS, na banda espectral k .

$L_{i,j,k}$ = radiância, na banda k , para a abertura do sensor ($mW/cm^2 \cdot sr$),

$CalCoefk$ = coeficiente de calibração para a radiância na banda k ($mW/cm^2 \cdot sr \cdot DN$)

$DN_{i,j,k}$ = valor digital da imagem, para o pixel i,j,k (DN)

Os valores de $CalCoef$ são os listados abaixo.

Quadro 6 – Características espectrais do sensor IKONOS.

Band	Lower 50%(nm)	Upper 50%(nm)	Bandwidth (nm)	Center (nm)
Pan	525.8	928.5	403	727.1
MS-1 (Blue)	444.7	516.0	71.3	480.3
MS-2 (Green)	506.4	595.0	88.6	550.7
MS-3 (Red)	631.9	697.7	65.8	664.8
MS-4 (VNIR)	757.3	852.7	95.4	805.0

Quadro 7 – IKONOS - coeficientes de calibração para produtos com 11 bits.
[DN/mW/(cm²-ster)]

Production Date	Blue	Green	Red	NIR
pre 2/22/01	633	649	840	746
post 2/22/01	728	727	949	843

O valor dos pixels é dado em 0,1 W/m².

Cálculo da radiância no topo da atmosfera

Através da fórmula:

$$J = F \cdot J_0 \left(\frac{d}{D} \right)^2 \cos Z \quad (13)$$

Onde: J é a emitância corrigida,

F é a fração da radiação emitida pelo Sol como corpo negro, por banda.

Valores utilizados:

Blue: 13,0359% (.4-.5 nm)

Green: 13,2960% (.5-.6 nm)

Red: 11,2394% (.6-.7 nm)

NIR: 16,43270% (.7-.9 nm)

J₀ é a emitância média do Sol no topo da atmosfera 1367 W/m²,

d é a distância média Terra-Sol (UA) 1,496x10¹¹m

D é igual à distância instantânea Terra-Sol

CosZ é o ângulo zenital ou (ângulo de elevação senX)

Calibração espectral

Cálculo da reflectância

$$R_e = \frac{L_{i,j,k}}{J} \quad (14)$$

Exemplo: correção atmosférica da banda do vermelho de uma imagem IKONOS:

Dados:

Order Date: 10/09/2002

Description of IKONOS images

Directory Name: 4120mato_grosso/

Acquisition Date: 04/30/2000

Site Name: Sinop Mato Grosso

Site Type: Tower

Data Version: beta

Data Processing Level: Master

Area of Image (km2): 49.0

Center Lat/Lon (decimal deg.): -11.4123,-55.3247

Source Image ID: 2000043013464130000011614334

Product Image ID: 000

Sensor: IKONOS-2

Acquired Nominal GSD

Cross Scan: 0.85 meters

Along Scan: 0.83 meters

Scan Direction: 0 degrees

Nominal Collection Azimuth: 262.2328 degrees

Nominal Collection Elevation: 79.57142 degrees

Sun Angle Azimuth: 47.1202 degrees

Sun Angle Elevation: 51.76979 degrees

Acquisition Date/Time: 2000-04-30 13:46 (GMT)

1-Calibração radiométrica:

$$L_{i,j,k} = DN \cdot (840)^{-1} \cdot 0.1$$

$L_{i,j,k}$ são valores de radiância em W/m²;

2-Cálculo da radiância no topo da atmosfera

$$J = F \cdot J_0 \cdot \left(\frac{d}{D} \right)^2 \cdot \sin X \quad (15)$$

Onde

$F=0,112394$

$J_0=1367 \text{ W/m}^2$

$(d/D)^2=1,00605$

$X=51,76979$ (Sun angle elevation)

$J=121,421161 \text{ W/m}^2$

3-Cálculo da Reflectância

$$R_e = L_{i,j,k} / J = DN \cdot (840)^{-1} \cdot 0.1 \cdot (121.421161)^{-1}$$

Quadro 8 – Valores de irradiação solar no topo da atmosfera (em $\text{W m}^{-2} \mu\text{m}^{-1}$) para os sistemas sensores IKONOS e Landsat 7.

Band	Landsat 7	IKONOS
Blue	1970.000	1939.429
Green	1843.000	1847.400
Red	1555.000	1536.408
NIR	1047.000	1147.856

The final formula that incorporates the spectral radiance and band pass conversions for IKONOS DN values now becomes:

$$\rho_p = \frac{\pi \cdot ND_\lambda / [(Calcoef_\lambda / 10) / Bandwidth_\lambda] \cdot d^2}{ESUN_\lambda \cdot \cos(\theta_s)} \quad (16)$$

Onde,

ρ : reflectância planetária;

ND: valor digital em determinado pixel; Calcoef $_\lambda$:

Coeficiente de Calibração da banda;

Bandwith: largura da banda (nm);

ESUN $_\lambda$: irradiação solar no topo da atmosfera de acordo com a banda em questão;

θ_s : ângulo do Zenith solar, em graus;

d: distância Terra-Sol, em unidades astronômicas.

Estimativa da Espessura Ótica através de valores de Visibilidade

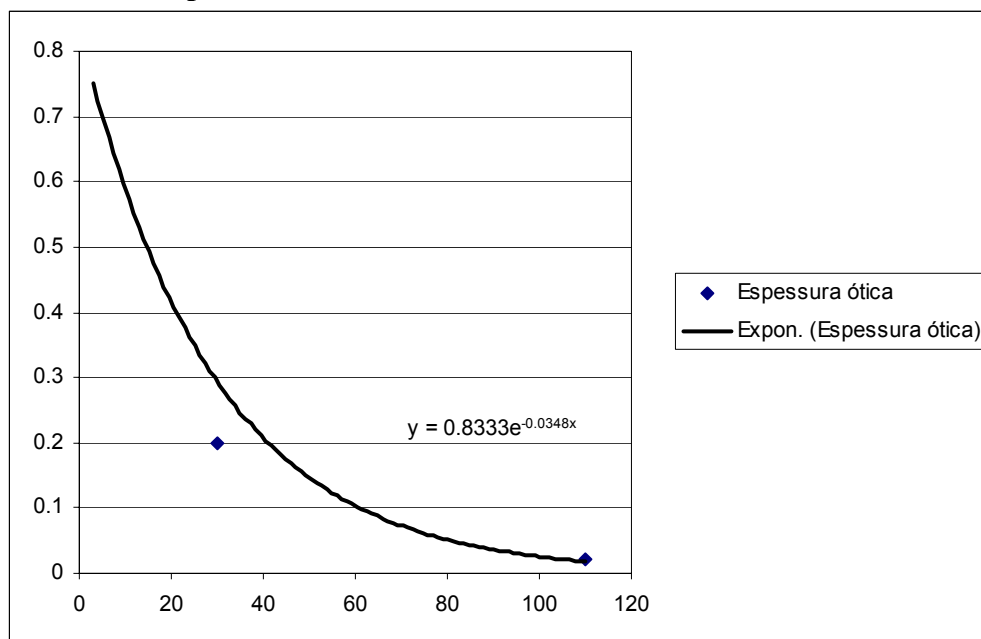


Figura 28 - variação da espessura ótica em função da visibilidade

Entradas Idrisi

Exemplo: Imagem IKONOS Sinop_2002

Wavelength of band centre: **#1** 0.481

Dn haze: Pixel que deveria ter em teoria ter uma reflexão 0 (sombra absoluta, #1: 145)

Optical thickness: equação fig. 25

Offset: 0

Gain: #1 1/728 (valor do quadro 10)/10 (0.013736)

Satellite viewing angle: 0

Spectral diffuse sky irradiance: 0

Sun elevation: 48.78098

Wavelength of band centre: **#2** 0.551

Dn haze: Pixel que deveria ter em teoria ter uma reflexão 0 (sombra absoluta, #2: 107)

Optical thickness: equação fig. 25

Offset: 0

Gain: #2 1/727 (valor do quadro 10)/10 (0.013755)

Satellite viewing angle: 0

Spectral diffuse sky irradiance: 0

Sun elevation: 48.78098

Wavelength of band centre: **#3** 0.665

Dn haze: Pixel que deveria ter em teoria ter uma reflexão 0 (sombra absoluta, #3: 48)

Optical thickness: equação fig. 25

Offset: 0

Gain: #3 $1/949$ (valor do quadro 10)/10 (0.010537)

Satellite viewing angle: 0

Spectral diffuse sky irradiance: 0

Sun elevation: 48.78098

Wavelength of band centre: #4 0.805

Dn haze: Pixel que deveria ter em teoria ter uma reflexão 0 (sombra absoluta, #4: 110)

Optical thickness: equação fig. 25

Offset: 0

Gain: #4 $1/843$ (valor do quadro 10)/10 (0.011862)

Satellite viewing angle: 0

Spectral diffuse sky irradiance: 0

Sun elevation: 48.78098

REFERÊNCIAS

1. Landsat 7 Science Data Users Handbook:

[http://ltpwww.gsfc.nasa.gov/IAS/handbook/handbook_htmls/chapter12/
/chapter12.html](http://ltpwww.gsfc.nasa.gov/IAS/handbook/handbook_htmls/chapter12/chapter12.html)

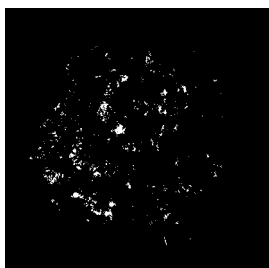
2. Space Imaging Document Number SE-REF-016, Rev. N/C

3. Conversion from DN to Planetary Reflectance, David Fleming, 2003, Version 2.0

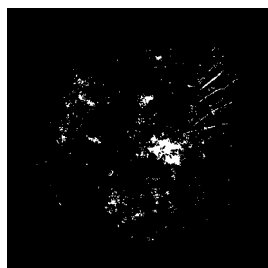
Corrects for misplaced formula parenthesis in Version 1.2, CRESS Project,
University of Maryland, Department of Geography. Earth Science Enterprise
Applications Directorate at the NASA Stennis Space Center.

Anexo 2

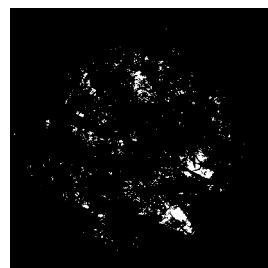
FOTOGRAFIAS HEMISFÉRICAS Aspecto das fotografias nos pontos do arranjo



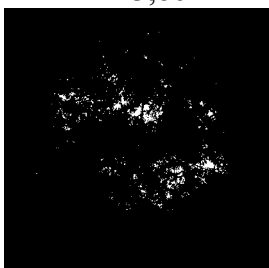
01.
LAI=3,86



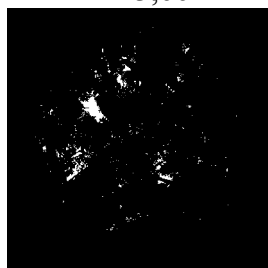
02.
LAI=3,66



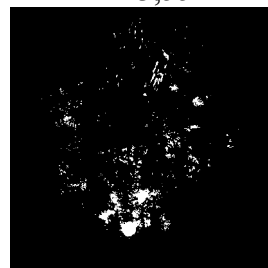
03.
LAI=3,55



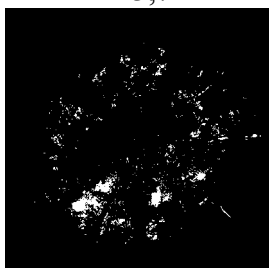
04.
LAI=3,74



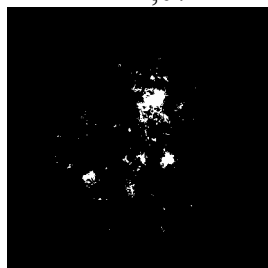
05.
LAI=4,07



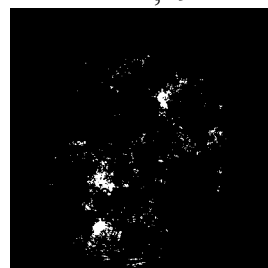
06.
LAI=4,49



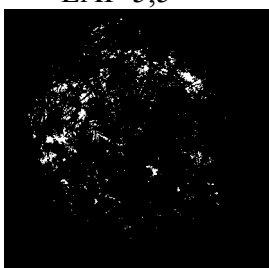
07.
LAI=5,5



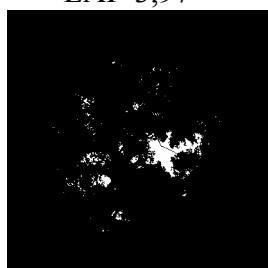
08.
LAI=3,97



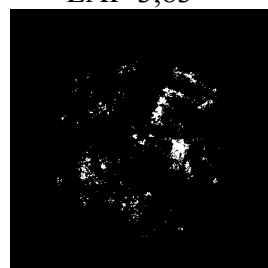
09.
LAI=3,83



10.
LAI=4,25



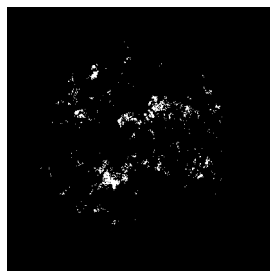
11.
LAI=3,9



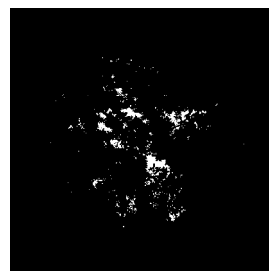
12.
LAI=3,61



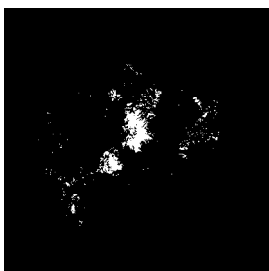
13.
LAI=4,12



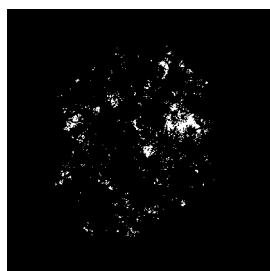
14.
LAI=4,14



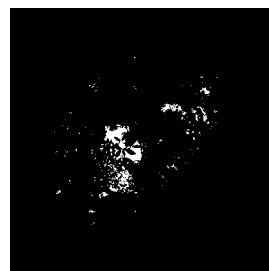
15.
LAI=3,64



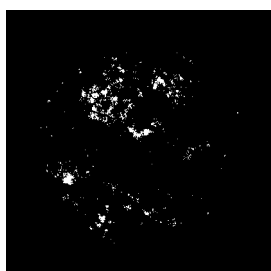
16.
LAI=3,78



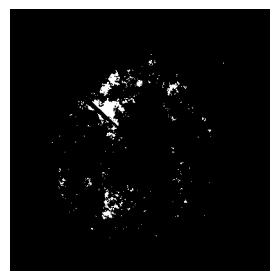
17.
LAI=5,14



18.
LAI=4,03



19.
LAI=5,07



20.
LAI=5,91

Anexo 3

ÍNDICES ESPECTRAIS DE VEGETAÇÃO

Índices espectrais de vegetação

Um índice de vegetação é um número gerado por uma combinação entre bandas que apresenta relação empírica com a quantidade ou qualidade de vegetação acusada no pixel de uma imagem. Para ilustrar essa ciência e de modo a não desviar dos objetivos, apresentamos breves definições de diferentes índices encontrados na literatura.

Alguns índices e principais características:

a) SR

Razão Simples (SR - Simple Ratio ou RVI – Ratio Vegetation Index), é dado pela razão simples entre as reflectâncias observadas na banda do vermelho e infravermelho:

$$RVI = \frac{\rho_{NIR}}{\rho_{red}} \quad (1)$$

b) NDVI

(Normalized Difference Vegetation Index, KRIEGLER et al., 1973), RVI e NDVI são funcionalmente equivalentes e relacionados por

$$NDVI = \frac{RVI - 1}{RVI + 1} \quad (2)$$

tem a vantagem de variar entre -1 e 1, enquanto o RVI varia entre 0 e infinito:

$$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{red}}{\rho_{NIR} + \rho_{red}} \quad (3)$$

c) IPVI

(Infrared Percentage Vegetation Index, CRIPPEN, 1990), é funcionalmente equivalente ao NDVI e relacionado por:

$$IPVI = \frac{NDVI + 1}{2} \quad (4)$$

Tem a vantagem computacional de apresentar somente valores positivos, variando entre 0 e 1:

$$IPVI = \frac{\rho_{NIR}}{\rho_{NIR} + \rho_{red}}. \quad (5)$$

d) DVI

(Difference Vegetation Index), é um índice perpendicular, com as linhas de iso-vegetação paralelas à linha do solo, que tem uma inclinação arbitrária e passa através da origem:

$$DVI = \rho_{NIR} + \rho_{red} \quad (17)$$

e) PVI

(Perpendicular Vegetation Index) descrito pela primeira vez por RICHARDSON & WIEGAND (1977), pode ser considerado como uma generalização do DVI que serve para diferentes inclinações de linhas de solos. É bastante sensível às variações atmosféricas, sendo pouco indicada em trabalhos com intercomparações temporais sem o uso de imagens com correção atmosférica. Seus valores podem variar entre -1 e 1.

$$PVI = \sin(\alpha)\rho_{NIR} - \cos(\alpha)\rho_{red} \quad (18)$$

onde α é o ângulo entre a linha do solo e o eixo de ρ_{NIR} .

f) WDI

(Weighted Difference Vegetation Index, CLEVERS, 1988)

$$WDVI = \rho_{NIR} - \gamma \cdot \rho_{red} \quad (19)$$

onde γ é a inclinação da linha do solo.

g) SAVI

(Soil Adjusted Vegetation Index, HUETE, 1988)

$$SAVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{red}}{\rho_{NIR} + \rho_{red} + L}(1 + L) \quad (20)$$

h) TSAVI

(Transformed Soil Adjusted Vegetation Index, BARET et al., 1989; BARET & GUYOT, 1991)

$$TSAVI = \frac{s \cdot (\rho_{NIR} - s \cdot \rho_{red} - a)}{[a \cdot \rho_{NIR} + \rho_{red} - a \cdot s + X \cdot (1 + s^2)]} \quad (21)$$

i) MSAVI

(Modified Soil Adjusted Vegetation Index, QI et al., 1994)

$$MSAVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{red}}{\rho_{NIR} + \rho_{red} + L} (1 + L) \quad (22)$$

j) MSAVI2

(Second Modified Soil Adjusted Vegetation Index, QI *et al.*, 1994)

$$MSAVI2 = \frac{1}{2} \cdot \left[2(\rho_{NIR} + 1) - \sqrt{(2 \cdot \rho_{NIR} + 1)^2 - 8(\rho_{NIR} - \rho_{red})} \right] \quad (23)$$

k) GEMI

(Global Environmental Monitoring Index, PINTY & VERSTRAETE, 1991),

$$GEMI = \eta \cdot (1 - 0,25 \cdot \eta) - \frac{\rho_{red} - 0,25}{1 - \rho_{red}} \quad (24)$$

onde

$$\eta = \left[\frac{2 \cdot (\rho_{NIR}^2 - \rho_{red}^2) + 1,5 \cdot \rho_{NIR} + 0,5 \cdot \rho_{red}}{\rho_{NIR} + \rho_{red} + 0,5} \right] \quad (25)$$

l) ARVI

(Atmospherically Resistant Vegetation Index, KAUFMAN & TANRÉ, 1992)

$$ARVI = \frac{\rho_{NIR} - (2\rho_{red} - \rho_{blue})}{\rho_{NIR} + (2\rho_{red} - \rho_{blue})} \quad (26)$$

m) EVI

(Enhanced Vegetation Index),

$$EVI = G \cdot \frac{\rho_{NIR} - \rho_{red}}{\rho_{NIR} + C_1 \cdot \rho_{red} - C_2 \cdot \rho_{blue} + L} \quad (27)$$