

THOMÉ SIMPLICIANO ALMEIDA

**SENSIBILIDADE DA REFLETÂNCIA DE UMA FLORESTA TROPICAL EM
460 nm, 650 nm E 850 nm AOS PARÂMETROS ÓPTICOS E
ARQUITETÔNICOS DO DOSSEL**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Meteorologia Agrícola, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

**VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL
2009**

THOMÉ SIMPLICIANO ALMEIDA

**SENSIBILIDADE DA REFLETÂNCIA DE UMA FLORESTA TROPICAL EM
460 nm, 650 nm E 850 nm AOS PARÂMETROS ÓPTICOS E
ARQUITETÔNICOS DO DOSSEL**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Meteorologia Agrícola, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 16 de fevereiro de 2009

Gilberto Chohaku Sedyama

Flávio Barbosa Justino

Edson Luís Nunes

Silvia de Nazaré Monteiro Yanagi
(Co-orientadora)

Marcos Heil Costa
(Orientador)

**Este trabalho é dedicado à
meu pai Antônio,
minha mãe Maria,
minha irmã Thaís,
meu irmão Thales,
e meu afilhado João.**

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Viçosa (UFV), especialmente ao Departamento de Engenharia Agrícola, pela oportunidade de realizar o curso.

Ao meu pai Antônio de Pádua Almeida e minha mãe Maria Goreti Almeida pelo grande apoio nas horas difíceis em que me encontrei, pelos incentivos profissionais, pelo amor, força e amizade.

Ao professor Dr. Marcos Heil Costa, pela orientação, amizade e apoio profissional.

Ao professor Dr. Yosio E. Shimabukuro pela orientação apoio e amizade no decorrer do trabalho.

À professora Ds. Silvia N. Monteiro Yanagi pela orientação amizade e apoio no decorrer do trabalho.

Em especial à Jaquelyne Azevedo pelo total apoio, carinho e presença.

Aos estudantes e ex-estudantes do Grupo de Pesquisa em Climatologia, Cleverson, Christiane, Gabrielle, Gleidson, Graciela, Leydimere, Isabel, Lívia, Hewlley, Letícia, Lucía, Luciana, Marcos Paulo, Mônica, Santiago, Sílvia, Édson, Francisca, Fabrício e Varejão, pelo coleguismo e pelas contribuições no desenvolvimento deste trabalho.

A todos os Professores do curso de Meteorologia Agrícola, pelos valiosos conhecimentos transmitidos através de suas disciplinas com dedicação, profissionalismo e amizade.

A todos os demais professores, colegas e funcionários que participaram da realização deste trabalho, o meu sincero agradecimento.

BIOGRAFIA

Thomé Simpliciano Almeida, filho de Antônio de Pádua Almeida e Maria Goreti Almeida, nasceu dia 12 de maio de 1983, na cidade de São José dos Campos – São Paulo – Brasil.

Em outubro de 2006 concluiu o curso de Bacharelado e Licenciatura em Física pela Universidade Federal de Viçosa (UFV).

Em outubro de 2006 iniciou o curso de pós-graduação, em nível de mestrado, em Meteorologia Agrícola pela Universidade Federal de Viçosa (UFV).

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	vi
LISTA DE TABELAS	vii
LISTA DE SÍMBOLOS	viii
RESUMO	ix
ABSTRACT	xi
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1. Propriedades espectrais da vegetação	5
2.2. Modelos de refletância	7
2.3. Descrição do modelo IBIS	10
2.4 Característica do sensor MODIS	11
2.4.1. Refletância de superfície (produtos MOD09 e MYD09)	12
2.4.2. Índice de vegetação (produtos MOD13 e MYD13)	13
3. MATERIAIS E MÉTODOS	15
3.1. Descrição da área experimental	15
3.2. Obtenção e processamento dos dados MODIS/TERRA e MODIS/AQUA	16
3.3. Implementação das bandas no IBIS	19
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	21
4.1. Análise de sensibilidade	21
4.2. Calibração da refletância e inclinação das folhas	25
5. SUMÁRIO E CONCLUSÕES	30
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	32

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Espectro de Refletância de uma folha saudável	6
Figura 2 - Desenho esquemático das possíveis interações da radiação eletromagnética até a incidência sobre o sensor	8
Figura 3 - Parâmetros geométricos, espectrais e biofísicos da vegetação.	9
Figura 4 - Localização do sítio K34.	15
Figura 5 - Tile adquirido, referente à localização do K34.	16
Figura 6 - Pixel referente à localização do K34.	17
Figura 7 - Dados do MODIS após a seleção dos pixels	18
Figura 8 - Sensibilidade da inclinação das folhas da parte superior e inferior do dossel	22
Figura 9 - Sensibilidade da refletância das folhas da parte superior e inferior do dossel	23
Figura 10 - Sensibilidade da refletância das folhas da parte inferior do dossel.....	24
Figura 11 - Valor do RMSE para cada valor de refletância e inclinação das folhas	27
Figura 12 - RMSE para as configurações da inclinação das folhas e refletância da folha em cada comprimento de onda.	28
Figura 13 - Dispersão entre os dados MODIS e obtidos pelo IBIS.....	29

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Características do sensor MODIS (TERRA - AQUA)	12
Tabela 2 - Parâmetros usados pelo modelo.....	20

LISTA DE SÍMBOLOS

f_{lo}	Fração de cobertura do solo devido à parte inferior do dossel
f_{up}	Fração de cobertura do solo devido à parte superior do dossel
I_{in}^d	Campo de irradiância incidente puramente colimada
I_{in}^i	Campo de irradiância incidente puramente isotrópica
L	Índice de área foliar
N	Número digital
$\rho_{\lambda-lo}$	Refletância das folhas da parte inferior do dossel
$\rho_{\lambda-up}$	Refletância das folhas da parte superior do dossel
r	Refletância do dossel
r^d	Refletância hemisférica direcional
r^i	Refletância hemisférica indireta
S	Índice de área de galhos
$\tau_{\lambda-lo}$	Transmitância das folhas da parte inferior do dossel
$\tau_{\lambda-up}$	Transmitância das folhas da parte superior do dossel
VFR	Valor físico de refletância
χ_{lo}	Inclinação das folhas da parte inferior do dossel
χ_{up}	Inclinação das folhas da parte superior do dossel

RESUMO

ALMEIDA, Thomé Simpliciano, M.Sc. Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2009. **Sensibilidade da refletância de uma floresta tropical em 460 nm, 650 nm e 850 nm aos parâmetros ópticos e arquitetônicos do dossel.** Orientador: Marcos Heil Costa. Co-orientadores: Yosio Edemir Shimabukuro e Silvia de Nazaré Monteiro Yanagi

Estudar e monitorar a vegetação - floresta, cerrado ou outro tipo de cobertura - é de suma importância para se entender o padrão climático atual. Os Modelos de Dinâmica de Vegetação (MDV) são ferramentas úteis nos estudos de determinado bioma, pois são baseados em princípios físicos e em condições iniciais e de contorno, podendo então obter indícios dos fatores que influenciam o ambiente modelado, fazer previsões futuras do comportamento da vegetação e, associados a outros modelos, fazer previsões futuras da influência da vegetação no clima, ou da mudança do clima na vegetação. Em particular, os modelos de refletância fazem parte dos MDV. Alguns estudos têm sido feitos para identificar a influência dos componentes do dossel sobre a resposta do albedo da cobertura vegetal, obtendo a melhor configuração dos parâmetros a serem usados. Porém, o estudo da refletância para menores faixas do espectro eletromagnético indica mais detalhadamente as feições dos alvos estudados. Para a vegetação, importantes características são estimadas a partir da resposta da refletância de faixas específicas. Nesse aspecto o objetivo desse trabalho foi adicionar três bandas vermelho, infravermelho próximo e azul, referentes às bandas 1, 2 e 3 do sensor MODIS, a bordo dos satélites TERRA e AQUA, no modelo IBIS - Integrated

Biosphere Simulator - observando a sensibilidade aos parâmetros óticos e arquitetônicos do dossel e calibrando esses parâmetros de acordo com os produtos de refletância de superfície e índice de vegetação do MODIS para a Reserva do Cuieiras (K34). A análise de sensibilidade indicou forte resposta para os parâmetros referentes à parte superior do dossel. A combinação dos parâmetros que minimizou o RMSE do EVI - *Enhanced Vegetation Index* ($RMSE_{\min} = 0,0245$) foi a inclinação das folhas do dossel superior $\chi_{up} = 0,92$, refletância das folhas da parte superior do dossel na faixa do azul $\rho_{blue-up} = 0,0162$, vermelho $\rho_{red-up} = 0,0466$ e infravermelho próximo $\rho_{nir-up} = 0,4427$.

ABSTRACT

ALMEIDA, Thomé Simpliciano, M.Sc. Universidade Federal de Viçosa, February, 2009. **Tropical rainforest reflectance Sensitivity in 460 nm, 650 nm and 850 nm to canopy architectural and optical parameters.** Advisor: Marcos Heil Costa. Co-advisors: Yosio Edemir Shimabukuro and Silvia de Nazaré Monteiro Yanagi.

Studying and monitoring the vegetation - forest, savannah or other types - is important to understand the current climatic standard. Dynamical vegetation models (DVM) are useful tools in biome studies as they are based on physical principles as well as on initial and boundary conditions, therefore can obtain evidence of the influence of factors on the modeled environment, predict future vegetation behavior and, in association with other models, make predictions about vegetation future influence on climate or about the effect of climate change on vegetation. In particular, reflectance models are part of DVMs. Some studies have attempted to identify, canopy elements on the response of the vegetation cover albedo, the effect of obtaining the best parameters configuration. However, the reflectance study for electromagnetic spectrum narrower bands shows further features of the studied objects. Important features are estimated from the response of specific bands vegetation reflectance. Therefore, the objective of this thesis was to add three bands - red, near infrared and blue, corresponding to the bands 1, 2 and 3 of the sensor MODIS, onboard the TERRA and AQUA satellites, into the IBIS model - Integrated Biosphere Simulator, observe the canopy reflectance sensitivity to architectural and optical parameters, and calibrate these parameters according to the surface reflectance products and vegetation index from MODIS for

the Reserve Cuieiras (K34). The sensitivity analysis indicates a strong response to the upper canopy parameters. The parameters combination that minimizes the RMSE of EVI - *Enhanced Vegetation Index* (RMSE = 0.0245) are the slope of the upper canopy leaves $\chi_{up} = 0.92$, reflectance from the upper canopy leaves in the blue band $\rho_{blue-up} = 0.0162$, red band $\rho_{red-up} = 0.0466$ and near infrared band $\rho_{nir-up} = 0.4427$.

1. INTRODUÇÃO

O clima da Terra passou por diversas mudanças no decorrer da história até os tempos atuais. Nas últimas décadas, a comunidade científica tem estudado os sinais de mudanças no clima da Terra utilizando informações paleoclimáticas (rochas antigas e geleiras), observações históricas de clima e dados de satélite. Eventos como mudanças nas correntes oceânicas, inclinação do eixo da Terra e erupções vulcânicas influenciaram nas variações do clima no planeta (Chambers *et al.*, 2007). Hoje, estudos vêm acumulando evidências de que as atividades humanas podem estar acelerando as mudanças no clima, contribuindo assim para expansão de áreas desertificadas, aumento no nível dos oceanos, diminuição da camada de ozônio e perda da biodiversidade (IPCC, 2007).

Mais da metade da produção primária líquida (NPP) anual, em todo o globo, ocorre nos trópicos, com a maioria dessa produção responsável pela floresta tropical (Mulkey *et al.*, 1996). A floresta Amazônica, por exemplo, tem influência no clima regional e global, tornando assim o estudo da dinâmica da vegetação na região Amazônica e a sua relação com o clima de grande interesse em estudos de interação ecossistema-biosfera (Kobayashi e Dye, 2005; Huete *et al.*, 2006).

Nesse aspecto, os modelos de dinâmica de vegetação (MDV) são ferramentas úteis nos estudos de determinado bioma, pois são baseados em princípios físicos e em condições iniciais e de contorno (Yanagi, 2006), podendo então obter indícios dos fatores influentes do ambiente modelado, fazer previsões futuras do comportamento da vegetação, e associados a outros modelos, fazer

previsões futuras da influência da vegetação no clima, ou da mudança do clima na vegetação.

Os MDV são integrados por um conjunto de modelos interdependentes de troca de massa, calor e momentum entre a atmosfera e a superfície terrestre. Em particular, os modelos de refletância fazem parte desse conjunto de modelos que integram os MDVs, pois a refletância da superfície é um importante fator na modelagem de diversos sistemas da Terra, sendo utilizada para o cálculo do albedo e fração da radiação fotossinteticamente ativa (FPAR) absorvida pelo dossel. A possibilidade de simular variações das características de uma cobertura e as respostas da refletância permitem estimar tendências e obter melhorias na configuração dos fatores que fazem parte dos modelos.

Porém, a contribuição de cada fator que influencia a refletância não tem sido adequadamente tratada, sendo que a combinação de informações de campanhas de campo, sensoriamento remoto e técnicas de modelagem são necessários para a caracterização dos fatores biofísicos e espectrais para a determinação precisa da refletância (Asner, 1998).

Yanagi (2006) avaliou a sensibilidade da resposta do albedo do modelo IBIS - Integrated Biosphere Simulator (Foley *et al.*, 1996) para uma floresta tropical nas bandas do visível e infravermelho próximo, variando os parâmetros arquitetônicos (orientação das folhas) e parâmetros ópticos (refletância das folhas) do dossel. Desta forma, obteve-se a melhor configuração dos parâmetros a serem usados, tendo sido validados com campanha de campo na Reserva Biológica de Cuieiras (K34), localizada próximo a Manaus.

O estudo da refletância para menores faixas do espectro eletromagnético indica mais detalhadamente as feições dos alvos estudados. Para a vegetação, importantes características são estimadas a partir da resposta da refletância de faixas específicas. Duas faixas de importante análise para o estudo da vegetação são a do vermelho (650 *nm*) - que tem baixa refletância pela absorção da radiação solar devido à ação dos pigmentos fotossintetizantes das folhas - e a do infravermelho próximo (850 *nm*) - que possui alta refletância devido ao

espalhamento da radiação em função da estrutura celular das folhas (Knipling, 1970).

Atualmente uma ferramenta utilizada para o estudo e monitoramento da vegetação é o sensor *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS), que é o principal sensor a bordo das plataformas TERRA e AQUA de um total de cinco sensores na plataforma TERRA, lançado em 18 de dezembro de 1999 e seis sensores na plataforma AQUA com lançamento em 4 de maio de 2002. Os dois sensores têm características similares, porém os satélites possuem horário de passagem diferente, sendo 10h30min AM para o satélite TERRA e 01h30min PM para o AQUA.

Diversas aplicações têm sido atribuídas ao uso do MODIS e seus produtos, para o estudo das florestas tropicais. Variações sazonais e fenologia das folhas (Xiao *et al.*, 2006; Huete *et al.*, 2006) foram identificadas com o uso dos dados de EVI (*Enhanced Vegetation Index*) do MODIS, onde concluíram que a atribuição dessa sazonalidade pode estar ligada a sazonalidade da radiação solar e não a estações de chuva. As estimativas de índice de área foliar, sazonalidade desse índice (Liu *et al.*, 2008; Asner *et al.*, 2003), e produção primária bruta – GPP (Ichii *et al.*, 2007) são completadas e avaliadas através dos dados obtidos pelo MODIS.

Um dos produtos disponibilizados é o MOD09 (MODIS/TERRA)/MYD09 (MODIS/AQUA), referente à refletância da superfície, com os comprimentos de onda centrados em 648, 858, 470, 555, 1240, 1640 e 2130 *nm* correspondendo às bandas 1 a 7. Este produto é uma estimativa da refletância espectral de superfície para cada uma das bandas.

Outros dois produtos oferecidos pelo MODIS são o MOD13 (MODIS/TERRA) e MYD13 (MODIS/AQUA), derivados do produto MOD09 e MYD09 respectivamente, disponibilizando dados de dois índices de vegetação, o NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) e o EVI. Estes índices fornecem comparações consistentes de dados temporais e espaciais das condições da vegetação global, monitorando a atividade fotossintética da vegetação, detecção de mudança e interpretações biofísicas e da fenologia.

Considerando a necessidade dos estudos dos parâmetros que interferem na resposta da refletância de um dossel, o objetivo desse trabalho foi estudar a sensibilidade da refletância de uma floresta tropical simulado pelo *Integrated Biosphere Simulator* – IBIS para a Reserva Biológica do Cuieras – K34, equivalentes às bandas 1, 2 e 3 do MODIS, bandas do vermelho (650 nm), infravermelho próximo (850 nm) e azul (460 nm).

De forma específica esse trabalho teve como objetivos:

(1) Modificação do código IBIS para a simulação da refletância nas bandas do vermelho, infravermelho próximo e azul, referentes às bandas 1, 2 e 3 do MODIS (refletância de superfície) e para o cálculo do NDVI e EVI;

(2) Análise da sensibilidade da refletância em relação aos parâmetros óticos (refletância das folhas) e arquitetônicos (distribuição angular das folhas - DAF) do dossel, e calibração do modelo;

(3) Obtenção dos dados do produto MODIS de refletância de superfície (MOD09 e MYD09) e índice de vegetação (MOD13 e MYD13), através dos satélites TERRA e AQUA para o pixel do sítio K34, para o período 2002 a 2005;

(4) Validação da refletância e dos índices de vegetação simulados contra os produtos de refletância e índice de vegetação do MODIS.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Propriedades espectrais da vegetação

O estudo da interação da radiação eletromagnética (REM) com dosséis preocupa-se com a variação dos efeitos fisiológicos e geométricos sobre as respostas espectrais, e a partir dessas respostas podem-se introduzir perspectivas sobre outros parâmetros da vegetação, como biomassa ou estoque de carbono, etc.

A folha constitui o principal constituinte da vegetação na interação com a REM, sendo a análise da refletância, transmitância e absortância necessárias para a realização de estudos espectrais da vegetação. Isso porque as folhas apresentam-se transparentes, principalmente nos comprimentos de onda do infravermelho próximo. A resposta da refletância também depende dos ângulos de iluminação e de visada (Ponzoni e Shimabukuro, 2007).

Quando se considera somente a folha, verifica-se que a resposta espectral está relacionada com a composição química, morfológica, fisiológica e a umidade interna contida nas mesmas, onde cada uma exerce influência predominante em pelo menos três regiões do espectro ótico (Figura 1):

- a) **região do visível (400 – 720 nm):** região dominada pela absorção dos pigmentos existentes nas folhas (clorofila, carotenos e xantofilas). Existe uma absorção maior no azul (próximo de 440 nm) e na região do vermelho (650 nm) devido somente a clorofila.

- b) **região do infravermelho próximo (NIR) (720 – 1100 nm)**: região com pequena absorção da radiação e um considerável espalhamento interno, apresentando como característica principal a alta refletividade. A absorção pela água é baixa nessa região do espectro.
- c) **região do infravermelho médio (1100 – 3200 nm)**: região com grande absorção devido à presença de água líquida.

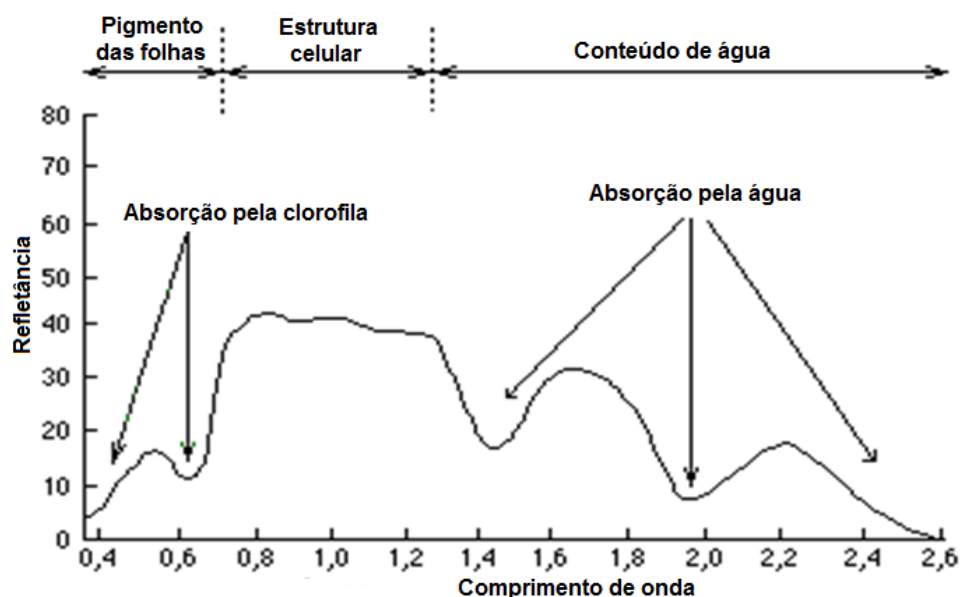


Figura 1 - Espectro de refletância de uma folha saudável. Fonte: Ponzoni e Shimabukuro (2007).

No que se refere aos dosséis vegetativos, a variação da refletância da cobertura vegetal em diferentes bandas espectrais depende principalmente da quantidade de folhas, das características ópticas (refletância de folhas e galhos), e da arquitetura do dossel (Índice de Área Foliar - IAF, distribuição angular das folhas e galhos), porém em alguns estudos têm se observado que a forma da curva da refletância de um dossel é semelhante à curva da refletância das folhas isoladas que compõem o dossel (Goel, 1988; Jensen, 2000; Ponzoni e Shimabukuro, 2007).

Alterações na curva espectral de uma determinada vegetação pode ser indício de mudança. Por exemplo, o envelhecimento das folhas causa aumento da

refletância na faixa de vermelho e azul; aumento do teor de umidade causa redução da refletância nos comprimentos 1,4 e 1,9 μm .

As faixas do vermelho e do infravermelho próximo apresentam comportamento antagônico em relação à mudança biofísica da vegetação. Durante o período de crescimento da vegetação, há uma redução da refletância na faixa do vermelho, devido à absorção da radiação pela clorofila. Por outro lado, a mudança na estrutura da folha e aumento do índice foliar causa uma elevação na refletância no infravermelho próximo.

2.2. Modelos de refletância

Os modelos são representações simplificadas da realidade, onde são inseridos os fatores mais significativos para a descrição de determinado fenômeno estudado. Para o estudo da refletância da vegetação, são inseridos vários fatores biofísicos e bioquímicos que afetam a resposta da refletância do dossel.

Os modelos de refletância têm um papel fundamental no entendimento da interação da radiação eletromagnética com dosséis florestais. Estas interações estão associadas às características do dossel ou aos fatores ambientais. Os modelos de refletância conectam as características biofísicas do dossel com a geometria de iluminação, resultando destas interações, os dados de refletância (Goel, 1988).

Segundo Goel (1988), os modelos de refletância simulam a resposta da refletância como resultado da interação da radiação eletromagnética com os diversos fatores (Figura 2), ou seja, a partir das características do alvo estima-se a resposta da refletância (*problema direto*). Assim, essa interação seria uma função de diversos fatores:

{a} *características da fonte*: normalmente o sol com propriedades que inclui a irradiância e localização espacial (ângulo zenital e azimutal solar);

{b} *interação com a atmosfera*: propriedades de absorção e espalhamento dos constituintes da atmosfera (ozônio, vapor da água e aerossóis);

{c} *interação com o dossel vegetal*: parâmetros ópticos (refletância e transmitância) e estruturais (formas geométricas e posicionamento de folhas, galhos, etc.);

{d} *interação com o solo*: propriedades como refletância, absorção, rugosidade, textura e umidade;

Chegando a uma função de refletância R , que é também dependente do comprimento de onda (λ):

$$R = f(\lambda, a, b, c, d) \quad (1)$$

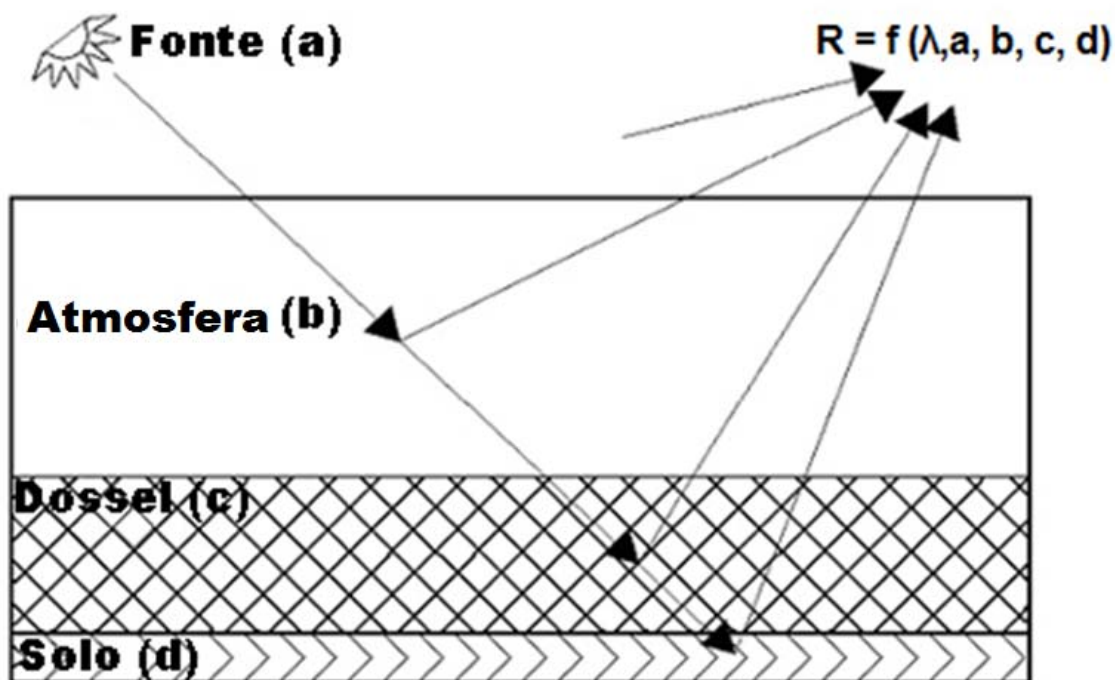


Figura 2 - Esquema das possíveis interações da radiação eletromagnética.
FONTE: Goel (1988).

As características do dossel que influenciam na resposta da refletância são: parâmetros geométricos, ópticos e arquitetônicos, onde os mais influentes estão representados na Figura 3.

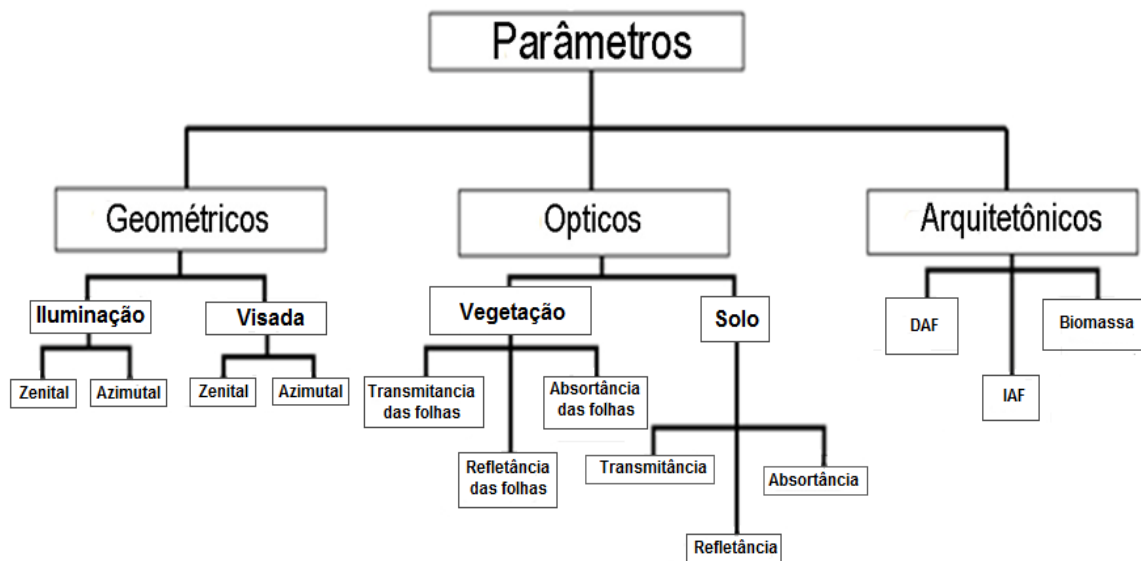


Figura 3 - Parâmetros geométricos, espectrais e biofísicos da vegetação.

Goel (1988) assume três principais categorias para modelos de refletância:

Modelos óticos geométricos: o dossel, para esse tipo de modelo, é composto de elementos geométricos distribuídos sobre a superfície, onde são usadas propriedades ópticas para calcular as áreas sombreadas e iluminadas e, posteriormente, a determinação das interações da REM com tais parâmetros;

Modelos de meio túrbido: são aplicados a dosséis homogêneos, onde é possível identificar diversas camadas homogêneas e características óticas (espalhamento e absorção). A somatória das interações de todas as camadas é assumida como a interação resultante de todo o dossel;

Modelos híbridos para dosséis heterogêneos: assim como muitas florestas tropicais, nem sempre os dosséis vegetativos apresentam-se homogêneos. Assim, os modelos híbridos assumem a existência de diferentes camadas (dosséis e sub dosséis) que tem extensões variadas em cada trecho e podem apresentar formas geométricas distintas. Os modelos híbridos têm um custo computacional mais elevado, porém apresentam resultados mais realistas.

A modelagem do comportamento da refletância da vegetação tem gerando estimativas de diversos parâmetros importantes para a modelagem de sistemas ambientais. Liu (2008) utilizou dados de satélite (MODIS), modelo de refletância

(*two-stream*) e um modelo de dinâmica de folha (Dickinson *et al.*, 2008), para inferir a sazonalidade do IAF, parâmetro que tem ligação direta com a performance dos modelos de superfície.

2.3. Descrição do modelo IBIS

O IBIS é um modelo integrado de processos de superfície e de ecossistemas terrestres (Foley *et al.*, 1996), tais como troca de energia, água e momentum entre a vegetação, solo e a atmosfera, fisiologia do ecossistema, fenologia da vegetação, dinâmica da vegetação e balanço de carbono. Para esse estudo será considerado somente a parte do modelo relacionada com a transferência radiativa solar nos dosséis.

No modelo IBIS a refletância do dossel é considerada como a razão entre o fluxo de radiação refletida e a incidente, sendo que a refletância total é uma média dos dois tipos de refletância (direta e difusa), cada uma associada com o campo de irradiância incidente, onde os dois tipos de refletância são combinados para obter a refletância da superfície:

$$r = \frac{I_{in}^d r^d + I_{in}^i r^i}{I_{in}^d + I_{in}^i} \quad (2)$$

em que r^d é a refletância hemisférica direcional associada ao campo de irradiância incidente que é puramente colimada I_{in}^d ; e r^i é a refletância hemisférica indireta associada com o campo de irradiância I_{in}^i que é puramente isotrópica.

A troca da radiação solar entre o solo, a vegetação e a atmosfera é calculada seguindo a aproximação *two-stream*, que consiste em combinar as características de refletância e transmitância de camadas subseqüentes a fim de avaliar a refletância em um determinado dossel. Por exemplo, se tomarmos um ponto intermediário entre as duas camadas do dossel (superior e inferior) como referência, o mesmo será iluminado por dois fluxos vindos da camada superior e inferior ao ponto de referência. O modelo considera o dossel constituído de duas

camadas e a presença do solo. O cálculo é separado para a radiação direta e difusa, ambos para as bandas do visível (400 a 700 nm) e infravermelho solar (700 a 4000 nm).

O algoritmo *two-stream* utiliza alguns parâmetros óticos e arquitetônicos do dossel. Os parâmetros arquitetônicos incluem orientação dos elementos da parte superior e inferior do dossel (χ_{up} , χ_{lo}), fração de cobertura do solo devido à parte superior e inferior do dossel (f_{up} , f_{lo}), índice de área foliar (L), índice de área de galhos (S). Dos parâmetros óticos temos refletância das folhas da parte superior e inferior do dossel nas bandas do visível e infravermelho (ρ_{vis-up} , ρ_{vis-lo} , ρ_{nir-up} e ρ_{nir-lo}), transmitância das folhas da parte superior e inferior do dossel, no visível e infravermelho (τ_{vis-up} , τ_{vis-lo} , τ_{nir-up} , τ_{nir-lo}).

Segundo a classificação de Goel (1988) a parte de transferência radiativa do modelo IBIS é considerada como sendo um modelo híbrido, visto a presença de camadas no dossel com diferentes propriedades óticas e geométricas.

Maiores descrições sobre o algoritmo *two-stream* podem ser encontradas em Dickinson (1983) e Sellers (1985), com descrição em Bonan (1996) e também encontrada em Oleson et al. (2004).

O modelo IBIS utiliza como dados de entrada, com o intervalo de uma hora, a velocidade do vento, temperatura do ar, precipitação, radiação incidente, radiação refletida e umidade relativa do ar. A parte de transferência radiativa solar nos dosséis utiliza somente a radiação incidente e refletida.

2.4 Característica do sensor MODIS

O sensor MODIS está a bordo dos satélites TERRA e AQUA, que fazem parte do programa *Earth Observing System* (EOS).

O sensor foi projetado para atuar em três campos diferentes: atmosfera, oceano e terra, com bandas, resoluções espectrais e espaciais para atender às necessidades desses três ambientes e oferecer uma cobertura global quase diariamente. O MODIS possui 36 bandas espectrais situadas entre 0,4 μm a

14,4 μm do espectro. Os dados podem ser encontrados em 3 resoluções espaciais diferentes, que são de 250 m para 2 bandas, 500 m para 5 bandas e 1000 m para 29 bandas (Justice *et al.*, 2002).

Resumidamente temos na Tabela 1 as características do MODIS:

Tabela 1- Características do sensor MODIS (TERRA - AQUA)

Órbita	705 km, sol síncrona, polar, 10h 30 min (TERRA) e 13 h30 min (AQUA)
Resolução espacial no NADIR	250 m (2 bandas), 500 m (5 bandas), 1000 m (29 bandas)
Repetição de cobertura	Diária para latitudes superiores a 30° e a cada dois dias, para latitudes inferiores a 30°
Quantização	12 bits
Faixa espectral	0,4 μm – 14,4 μm

Fonte: Jensen (2000)

Os produtos MODIS possuem georeferenciamento automático e a correção prévia para aerossóis atmosféricos que facilitam o uso dessas imagens em relação aos tradicionais sensores remotos de alta resolução. Os dados do MODIS sobre as florestas tropicais têm oferecido uma melhor resposta em relação à influência das nuvens e maior habilidade para a investigação de processos ecológicos temporais (Chambers *et al.*, 2007; Latorre *et al.*, 2003).

2.4.1. Refletância de superfície (produtos MOD09 e MYD09)

Os produtos MOD09 (MODIS/TERRA) e MYD09 (MODIS/AQUA) estimam a refletância espectral da superfície, com comprimentos de onda centrados em 648, 858, 470, 555, 1240, 1640 e 2130 nm. É um produto disponibilizado após o tratamento de correção atmosférica, o qual remove os efeitos de espalhamento e

absorção de gases e aerossóis, assim como os efeitos adjacentes causados pela variação da cobertura da superfície, os efeitos da geometria de visada e de iluminação (Latorre *et al.*, 2003).

Os produtos de refletância de superfície do MODIS foram testados segundo campanhas de campo e imagens do *Enhanced Thematic Mapper Plus* (ETM+) do satélite *Landsat* (Liang *et al.*, 2002). A dificuldade encontrada para a validação foi comparar as medidas de campo com um pixel do MODIS. Esse processo deveria considerar uma área homogeneamente grande, em relação ao pixel do sensor. Mesmo assim, os produtos foram considerados como bem precisos.

Os produtos de refletância da superfície são de grande importância, pois são dados de entrada para outros produtos fornecidos pelo MODIS, como índices de vegetação (NDVI e EVI), albedo, FPAR e IAF (Parkinson e Greenstone, 2000).

Esses produtos de refletância possuem informações sobre qualidade de cada pixel, que indicam a integridade de seus dados através do QA - *Quality Assessment* (MODIS Land, 2008), tais como:

- Integridade da estimativa da refletância da superfície;
- O sucesso da correção;
- Presença de nuvens;
- Presença de nuvens Cirrus (ausência, baixa, média e alta);
- Fonte de informações de aerossóis;
- Presença de aerossol (baixo, médio e alto);
- Fonte de informação de vapor d'água;
- Fonte de informação de ozônio;
- Se o pixel é terra ou água.

2.4.2. Índice de vegetação (produtos MOD13 e MYD13)

Diversos índices de vegetação têm sido propostos com o objetivo de explorar as propriedades espectrais da vegetação. Estes índices podem ser utilizados para estimar parâmetros biofísicos da vegetação, como biomassa e quantidade de clorofila (Price e Bausch, 1995).

Os produtos de Índice de Vegetação do MODIS (MOD13 – plataforma TERRA e MYD13 – plataforma AQUA) baseiam-se nos dados de refletância da superfície (MOD09 e MYD09) e a composição temporária destes geram os produtos de 16 dias, nas resoluções espaciais de 250, 500 ou 1000 m (Huete *et al.*, 2006).

Este produto fornece dois tipos de índices de vegetação, o NDVI e o EVI. O cálculo do NDVI e do EVI é feito por meio das Equações 3 e 4, respectivamente:

$$NDVI = \frac{(r_{nir} - r_v)}{(r_{nir} + r_v)} \quad (3)$$

em que r_v é a refletância no vermelho e r_{nir} é a refletância no infravermelho próximo.

$$EVI = G \times \frac{(r_{nir} - r_v)}{(r_{nir} + C_1 \cdot r_v - C_2 \cdot r_{blue} + L)} \quad (4)$$

em que r_{blue} é a refletância no azul, $C_1 = 6$ e $C_2 = 7,5$ são coeficientes de ajuste para efeito de aerossóis da atmosfera, $G = 2,5$ fator de ganho e $L = 1$ (solo totalmente coberto) é fator de ajuste para o solo (Huete *et al.*, 2002).

Para o monitoramento da vegetação, esses dois índices são bastante utilizados. Enquanto o NDVI é sensível à clorofila, o EVI é mais sensível às variações na resposta estrutural do dossel, incluindo o índice de área foliar (LAI), a fisionomia da planta e a arquitetura do dossel (Huete *et al.*, 2002). Estes dois índices fornecem informações sobre detecção de mudanças vegetais e parâmetros biofísicos do dossel e se complementam em estudos globais da vegetação.

O uso dos dados de índice de vegetação do MODIS tem sido aplicado em diversos trabalhos. Zhang *et al.* (2003) identificaram a fenologia e sazonalidade da vegetação, e em união com a modelagem observaram a relação entre a GPP e o EVI em um estudo na floresta Amazônica, onde identificaram uma sazonalidade do GPP acompanhada da resposta do produto EVI do MODIS (Ichii *et al.*, 2007).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Descrição da área experimental

O sítio experimental da Reserva do Cuieiras - K34 ($2^{\circ} 35'S$, $60^{\circ} 07'W$) está localizado a 60 *km* ao norte de Manaus-AM (Figura 4) e a 90 *m* acima do nível do mar. Caracterizado por uma floresta tropical com a altura do dossel de aproximadamente 30 *m*. A vegetação e a topografia desse sítio são típicas da Amazônia Central (Yanagi, 2006).

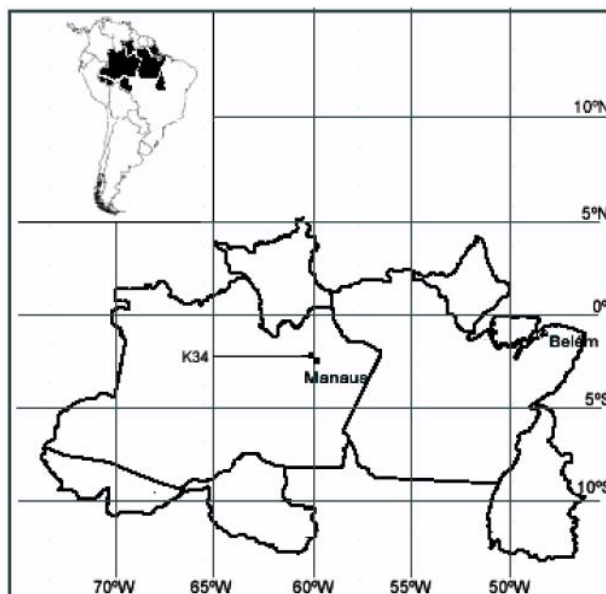


Figura 4 - Localização do sítio K34.

3.2. Obtenção e processamento dos dados MODIS/TERRA e MODIS/AQUA

Para essa pesquisa, foram utilizados os dados MODIS – MOD09Q1, MOD13Q1 (TERRA) e MYD09Q1, MYD13Q1 (AQUA) obtidos via FTP através da requisição das imagens realizada no site de distribuição *Earth Observing System Data Gateway*, com resolução espacial de 250 m. As imagens do MOD09Q1 e MYD09Q1 (refletância de superfície) têm uma resolução temporal de oito dias enquanto as imagens MOD13Q1 e MYD13Q1 têm a resolução de 16 dias. Os *Tiles* (sistema único de projeção e mosaico) adquiridos foram referentes à localização do K34 (Figura 5), para o período de 2002 a 2005. Posteriormente, foi selecionado o *pixel* correspondente à localização do sitio em estudo (Figura 6).

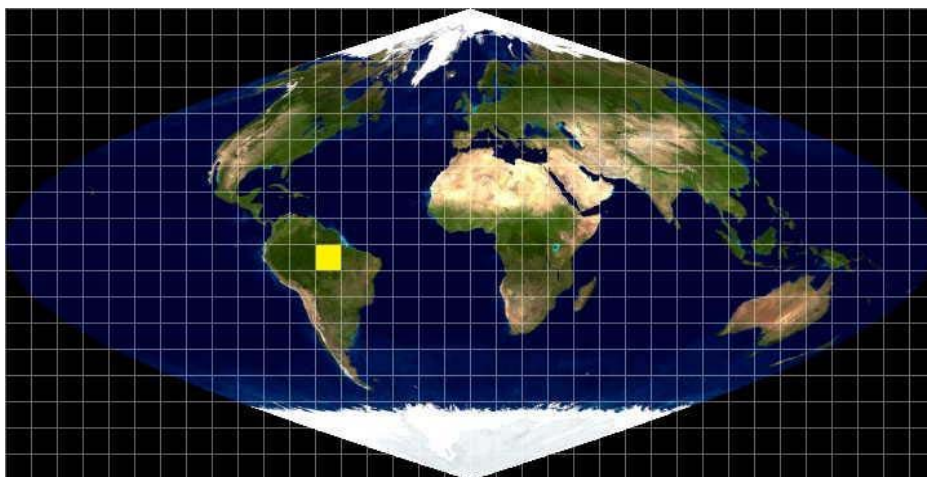


Figura 5 - *Tile* adquirido, referente à localização do K34.

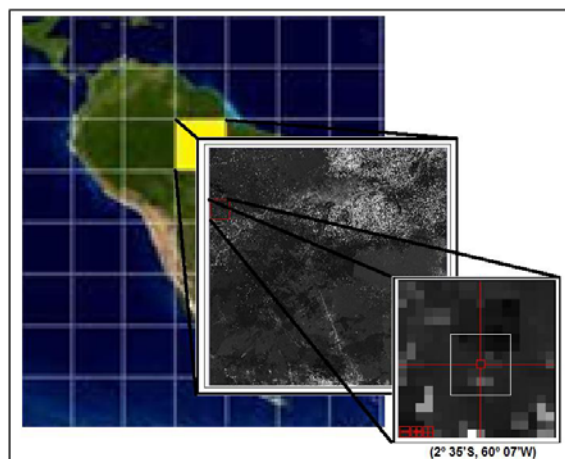


Figura 6 - Pixel referente à localização do K34.

As imagens foram correspondentes às datas dos dados de campo do K34 (dados utilizados para entrada do modelo), sendo selecionadas aquelas onde aparentemente estavam livres da presença de nuvens no local do sítio e com boa qualidade. Essa seleção foi feita a partir das informações QA (*Quality Assessment*) presente em cada pixel da imagem. Após essa primeira avaliação, os pixels que ainda não tinham boa qualidade foram substituídos pelo pixel mais próximo com melhor qualidade.

Os valores das refletâncias para o ano de 2002 do produto MOD09, antes (Figura 7a) e depois (Figura 7b) das avaliações das qualidades dos *pixels* podem ser visto na Figura 7. Na Figura 7a é possível observar *pixels* com valores altos de refletância devido à contaminação do pixel pelos constituintes atmosféricos. Assim, o *pixel* contaminado é substituído pelo *pixel* mais próximo que tenha uma melhor qualidade.

Os dados foram extraídos via programação NCL (*NCAR Command Language*).

Para comparação com a resposta do modelo, como as imagens aparecem com os valores em números digitais (ND), foi transformando o valor do brilho das bandas 1 (vermelho, 650 *nm*), 2 (infravermelho próximo, 850 *nm*) e 3 (azul, 460 *nm*) em valores físicos de refletância (VFR) utilizando o fator de conversão (Equação 5) para refletância em 16 *bits* (65536 níveis de cinza). Esse fator de conversão é fornecido no mesmo arquivo da imagem ou no site de distribuição dos

produtos MODIS. O mesmo procedimento foi realizado para os dados de NDVI e EVI, ou seja, a escolha dos melhores pixels e a transformação de níveis digitais para valores de NDVI e EVI físico. Os produtos MOD09, MOD13, MYD09, MYD13 utilizam o mesmo fator de conversão.

$$VFR = ND \times 0,0001 \quad (5)$$

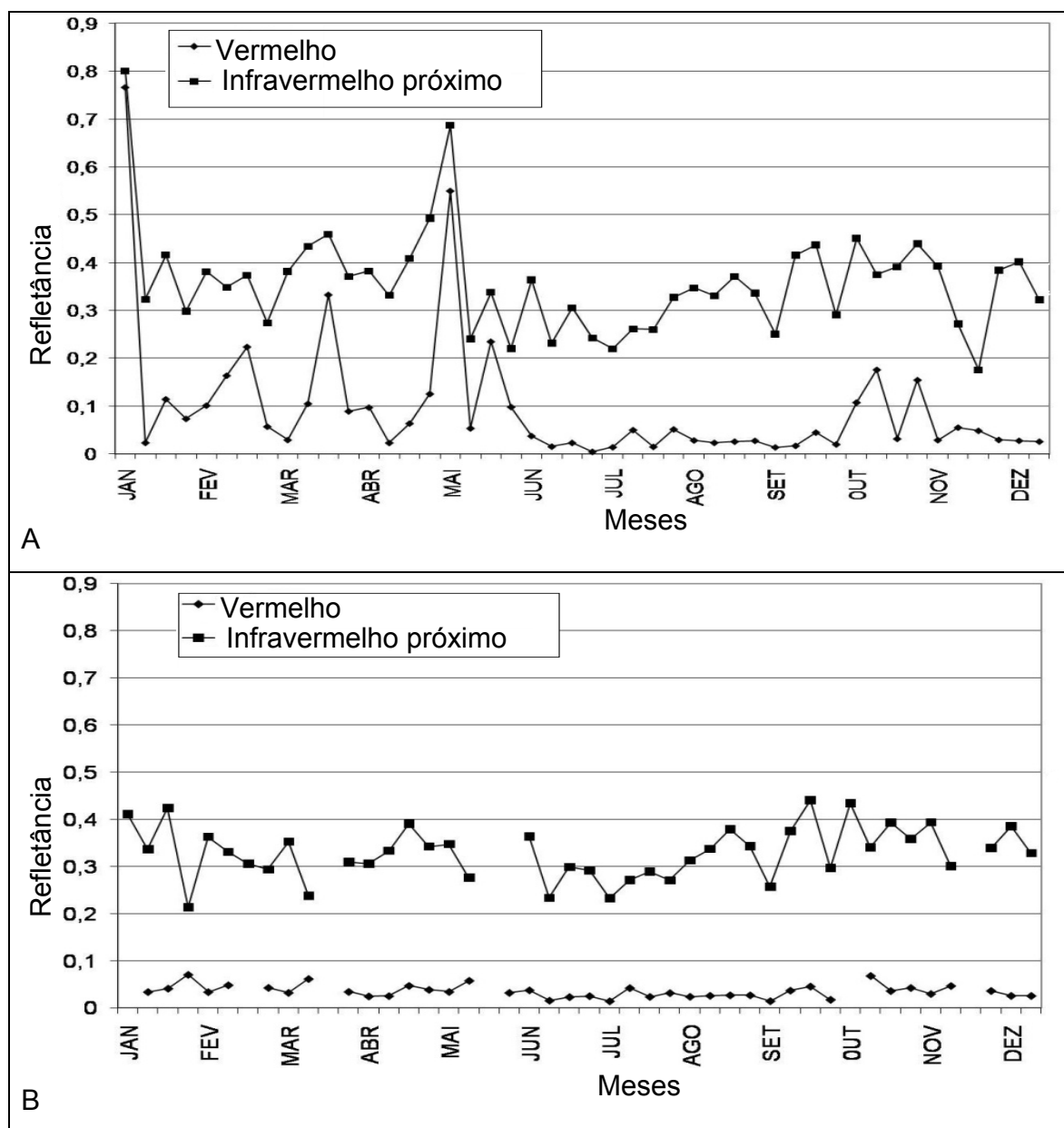


Figura 7 - Dados do MODIS antes (a) e após (b) a seleção dos pixels.

3.3. Implementação das bandas no IBIS

Nesse estudo, foi utilizada a versão 0-D do IBIS (Foley *et al.*, 1996). Para inserção das bandas na faixa do azul, vermelho e infravermelho próximo foi necessário acrescentar os parâmetros ópticos de cada banda. Assim, foram acrescentadas no código do programa, as refletâncias das folhas da parte superior e inferior do dossel nas faixas do azul, vermelho e infravermelho ($\rho_{blue-up}$, $\rho_{blue-lo}$, ρ_{red-up} , ρ_{red-lo} , ρ_{nir-up} , ρ_{nir-lo}). Foram adicionadas, para os cálculos, as transmitâncias das folhas e dos galhos para cada banda ($\tau_{blue-up}$, $\tau_{blue-lo}$, τ_{red-up} , τ_{red-lo} , τ_{nir-up} , τ_{nir-lo}).

Como o modelo já realizava os cálculos para as bandas do visível e infravermelho, os cálculos para a refletância do azul e vermelho foram de acordo às equações que o modelo utilizava para o cálculo da refletância no visível e os cálculos para o infravermelho próximo foram de acordo com as equações usadas para o infravermelho, diferindo somente no valor dos parâmetros das refletâncias das folhas em cada comprimento de onda.

A refletância do dossel em todas as bandas é calculada separadamente pelo modelo. Os dados de entrada para a parte de transferência radiativa do modelo IBIS são as radiações incidentes e refletidas medidas de 2002 a 2005, com o intervalo de uma hora.

Foram avaliados oito parâmetros óticos e arquitetônicos do modelo: orientação das folhas e galhos da camada superior do dossel (χ_{up}) e orientação das folhas da camada inferior do dossel (χ_{lo}), refletância das folhas da camada superior e inferior do dossel na faixa do vermelho, infravermelho e azul (ρ_{red-up} , ρ_{red-lo} , ρ_{nir-up} , ρ_{nir-lo} , $\rho_{blue-up}$ e $\rho_{blue-lo}$).

Outros parâmetros óticos e arquitetônicos do dossel, utilizados no IBIS (Tabela 2) foram mantidos fixos.

Tabela 2 - Parâmetros usados no modelo

Valores dos parâmetros arquitetônicos	
Índice de área foliar (L)	6,175
Índice de área de galhos (S)	0,025
Fração de cobertura da parte inferior do dossel (<i>f_{lo}</i>)	0,500
Fração de cobertura da parte superior do dossel (<i>f_{up}</i>)	0,975
Parâmetros óticos	
Refletância direta e difusa do solo no visível (<i>ag.VIS</i>)	0,100
Refletância direta e difusa do solo no infravermelho (<i>ag.NIR</i>)	0,400
Transmitância das folhas (dossel inferior) no visível (τ_{vis-lo})	0,070
Transmitância das folhas (dossel superior) no visível (τ_{vis-up})	0,050
Transmitância das folhas (dossel inferior) no infravermelho (τ_{nir-lo})	0,250
Transmitância das folhas (dossel superior) no infravermelho (τ_{nir-up})	0,200

Fonte: Yanagi (2006)

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Análise de sensibilidade

A análise de sensibilidade foi feita com o intuito de identificar os parâmetros arquitetônicos e biofísicos do dossel que mais influenciam na refletância do dossel para o sítio em estudo.

Os parâmetros de refletância simulados pelo modelo IBIS e analisados foram: orientação das folhas e galhos da camada superior do dossel (χ_{up}) e orientação das folhas da camada inferior do dossel (χ_{lo}), refletância das folhas da camada superior e inferior do dossel na faixa do azul, do vermelho e do infravermelho próximo ($\rho_{blue-up}$, $\rho_{blue-lo}$, ρ_{red-up} , ρ_{red-lo} , ρ_{nir-up} , e ρ_{nir-lo}).

A orientação das folhas, para as duas camadas, tiveram os valores simulados entre 1 (horizontal) e -1 (vertical). A resposta do modelo em relação aos dois parâmetros pode ser visto na Figura 8. Para a região Amazônica, a sensibilidade da inclinação das folhas, em geral é maior nas três bandas para o dossel superior. Pode-se observar ainda, que a refletância estimada pelo IBIS apresenta maior variação quando se modifica o χ_{up} que o χ_{lo} .

Isso porque, em uma floresta densa como a Amazônica, a parte superior do dossel cobre grande parte da radiação, impedindo a chegada na parte do dossel inferior e a retorno da refletância. Por isso, tem-se uma menor sensibilidade da refletância em relação às folhas da parte inferior do dossel.

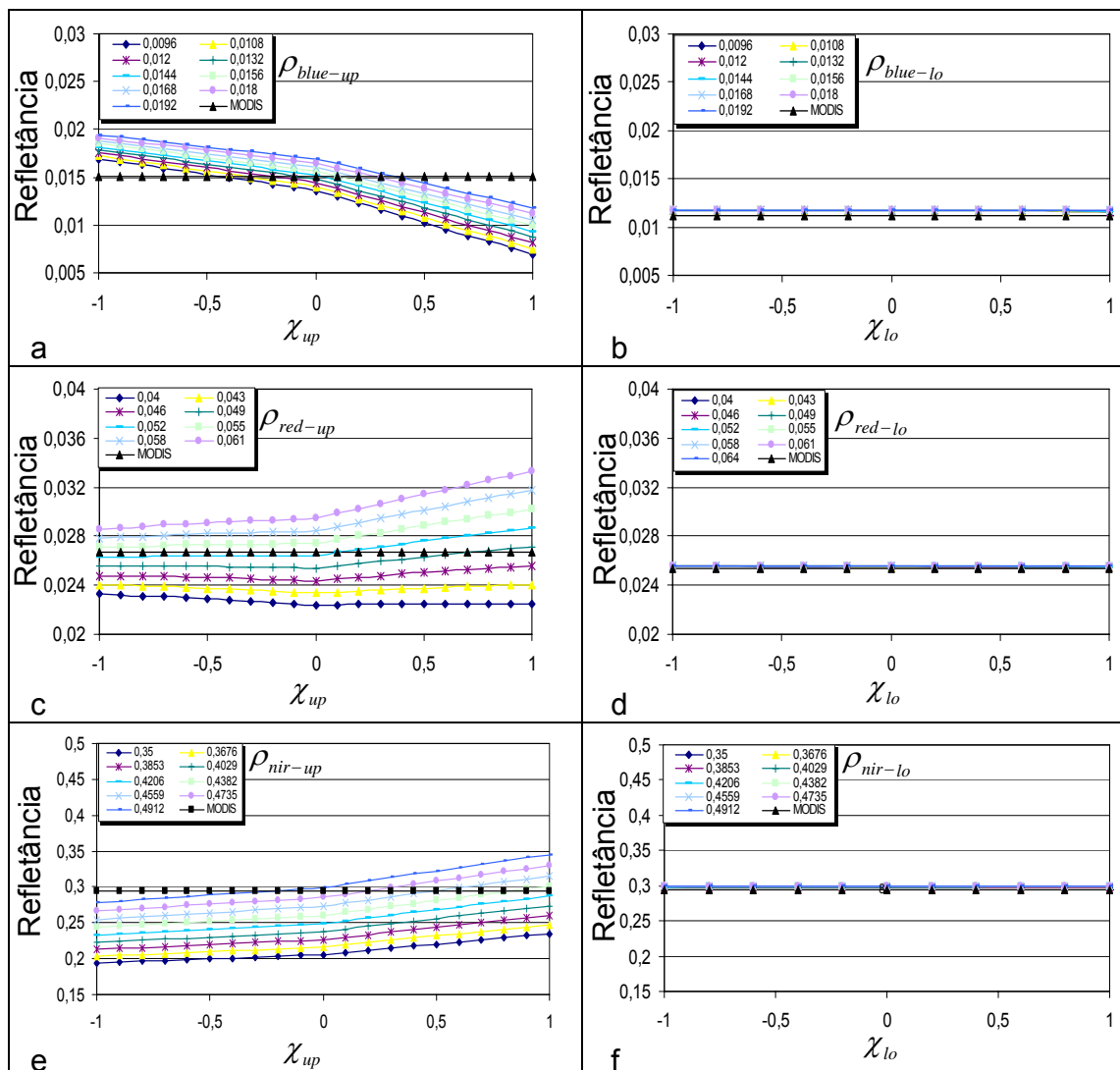


Figura 8 – Sensibilidade da refletância do dossel em relação à inclinação das folhas da parte superior (a - c - e) e inferior (b - d - f) do dossel. ab – azul; cd – vermelho; ef – infravermelho próximo.

O mesmo comportamento pode ser observado para a refletância das folhas do dossel superior e inferior para cada banda (Figura 9). Esses parâmetros tiveram seus valores variados entre uma faixa próxima dos valores de refletância das folhas simulado no programa LIBERTY, para a banda do azul, vermelho e infravermelho (Dawson *et al.*, 1998).

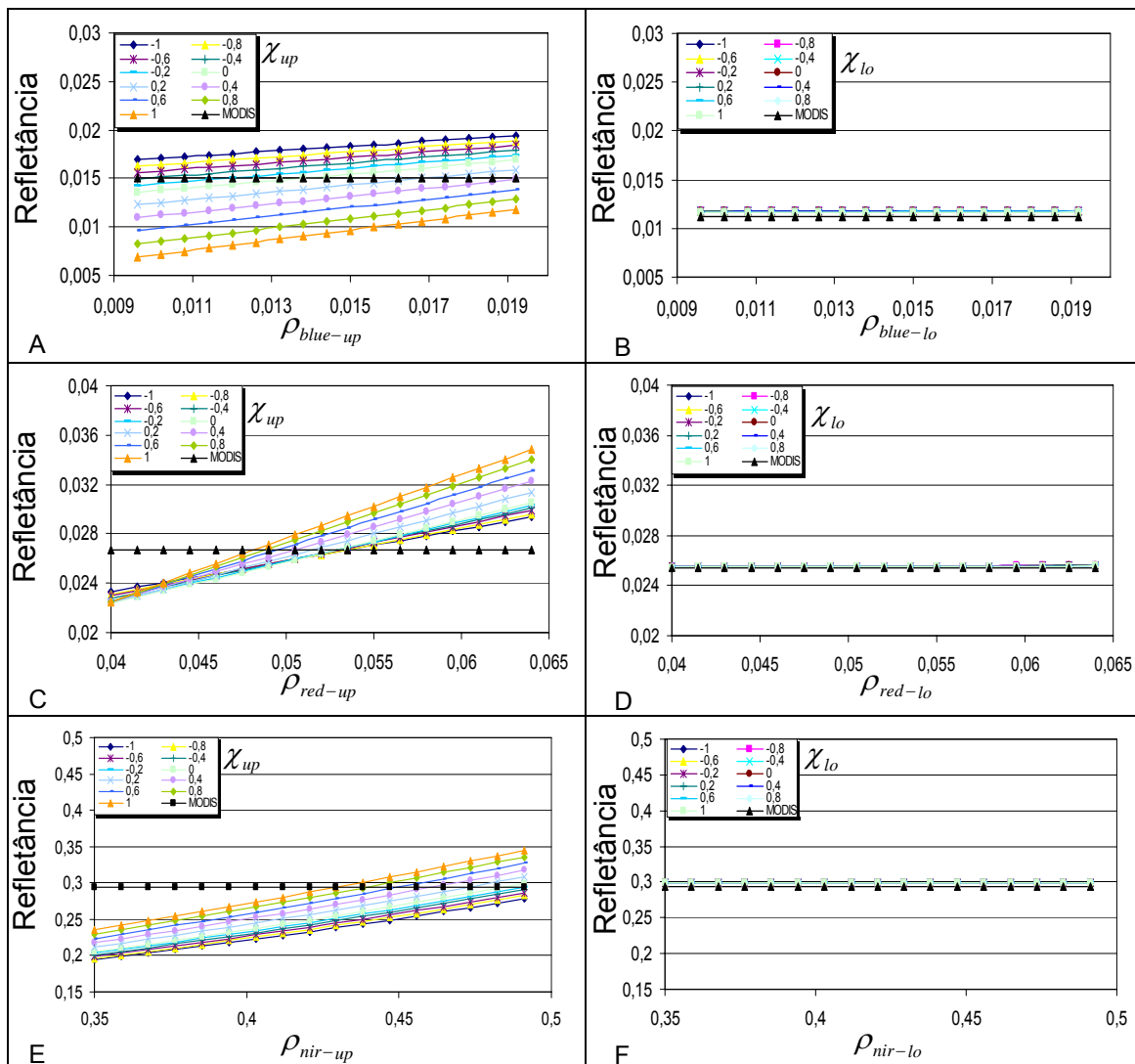


Figura 9 - Sensibilidade da refletância do dossel em relação à refletância das folhas da parte superior (A - C - E) e inferior (B - D - F) do dossel. ab - azul; cd - vermelho; ef - infravermelho próximo.

No propósito de uma melhor calibração da refletância, um ajuste dos elementos da camada inferior do dossel pode ser útil. Porém, somente na banda do infravermelho próximo mostrou ser mais sensível aos parâmetros de inclinação e refletância da folha para o dossel inferior. A Figura 10 mostra que a inclinação e a refletância das folhas no infravermelho da parte inferior do dossel afeta mais a refletância do dossel. Nesse trabalho não foi necessário a utilização de uma calibração fina, pois somente com os parâmetros do dossel superior já se atingia a aproximação entre os dados de refletância do MODIS e IBIS. Porém com dados

medidos em campo talvez uma melhor aproximação desse parâmetro pudesse ser ajustada.

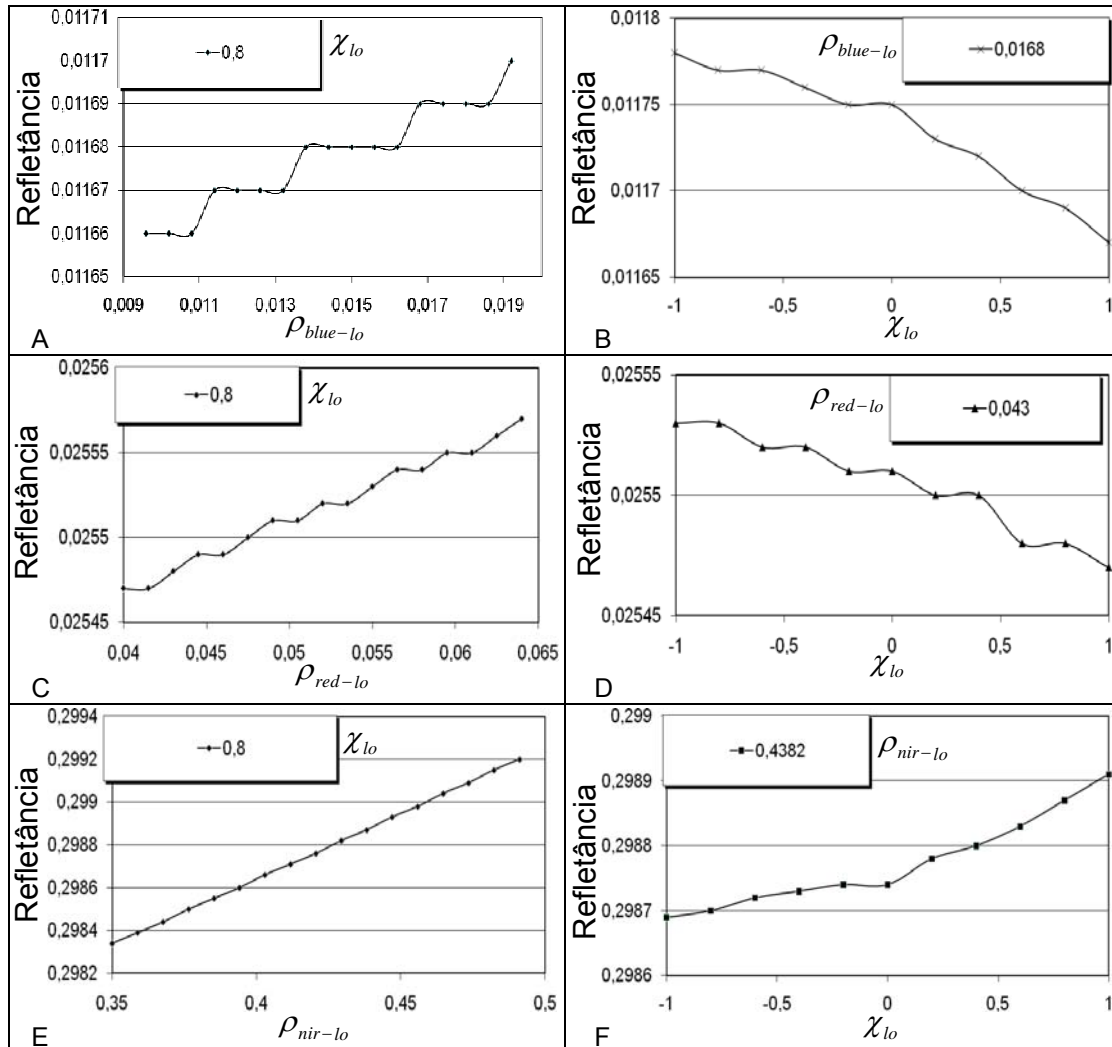


Figura 10 - Sensibilidade da refletância das folhas da parte inferior do dossel. AB – azul; CD – vermelho; EF – infravermelho próximo.

4.2. Calibração da refletância e inclinação das folhas

Com a análise de sensibilidade foi possível identificar que os parâmetros mais influentes na refletância em cada banda pertencem à parte superior do dossel. As refletâncias em cada banda da camada inferior do dossel, foram fixadas em 0,062 (para o azul e o vermelho) e 0,60 (para o infravermelho próximo), e a inclinação das folhas em $\chi_{lo} = 0,10$, valores obtidos por Yanagi (2006). Para os dados do MODIS, foram calibradas as refletâncias das folhas, para cada banda, e a inclinação das folhas (χ_{up}), todos para a camada superior do dossel.

Várias combinações entre refletância das folhas (em cada banda) e inclinação das folhas da parte superior do dossel foram testadas de acordo com dois produtos do MODIS, refletância de superfície e o índice de vegetação EVI. Assim, foi feita uma calibração desses fatores, levando em consideração cada banda separadamente e uma calibração levando em consideração as três bandas juntas (azul, vermelho e infravermelho próximo), que são utilizadas para o cálculo do EVI.

Essas calibrações foram feitas observando o menor valor do RMSE para a refletância obtida pelo modelo em comparação aos dados de refletância de superfície em cada banda do MODIS (Figura 11) e em relação ao EVI (Figura 12), combinando os valores de $\rho_{\lambda-up}$ e χ_{up} .

Para a refletância das folhas, os valores para os quais se obteve um melhor ajuste da refletância do dossel foram: para a faixa do azul, ($\rho_{blue-up}$) variando entre 0,0128 e 0,0137, para o vermelho (ρ_{red-up}) estão entre 0,0463 e 0,0471, e para o infravermelho próximo (ρ_{nir-up}) estão entre 0,4338 e 0,4348.

Com relação aos parâmetros geométricos, o valor da inclinação das folhas, que minimizou o RMSE da refletância do dossel, para as três bandas tiveram resultados distintos. Para a banda do azul, a melhor configuração foi χ_{up} entre os valores de 0 e 0,1, para o vermelho χ_{up} entre 0,37 e 0,47, e para a faixa do

infravermelho próximo os melhores valores estão entre 0,90 e 0,95 para χ_{up} . A diferença para os valores de χ_{up} encontrados para cada banda está relacionada aos erros causados pelas diferenças das propriedades de cada comprimento de onda estudados. Fenômenos como absorção, reflexão e espalhamento pelos constituintes da atmosfera, presença de água líquida nos componentes do dossel influenciam na refletância medida pelo sensor. Nem todos os dados do sensor referente à localização do sítio foram obtidos com a visada no nadir, isso causa uma diferença entre as medidas, que também é fonte de divergências na calibração.

Para encontrar um valor único para χ_{up} , mais condizente para o modelo, outra calibração foi realizada utilizando os produtos de EVI do MODIS. A razão é que o EVI é uma normalização das três bandas (azul, vermelho e infravermelho próximo) com fatores de correção atmosférica e do solo. Dessa forma tem-se, também, a calibração das três bandas e da inclinação das folhas simultaneamente (Figura 12).

Dessa maneira, a configuração para os parâmetros óticos e geométricos, que minimizou o RMSE (0,0245) foi $\rho_{blue-up} = 0,0162$, $\rho_{red-up} = 0,0466$, $\rho_{nir-up} = 0,4427$ e um $\chi_{up} = 0,92$.

Os valores ótimos da refletância das folhas na faixa do azul e infravermelho próximo tiveram pequenas alterações em relação à análise de cada banda separadamente, enquanto a banda do vermelho dentro da faixa ótima encontrada anteriormente.

Com relação à inclinação das folhas, o resultado mostrou aproximação com a calibração do infravermelho próximo, indicando que as correções (atmosféricas, solo e visada) contidas nos dados do EVI resultaram em bons resultados para a calibração, visto que o EVI possui correções tanto na faixa do azul como no vermelho.

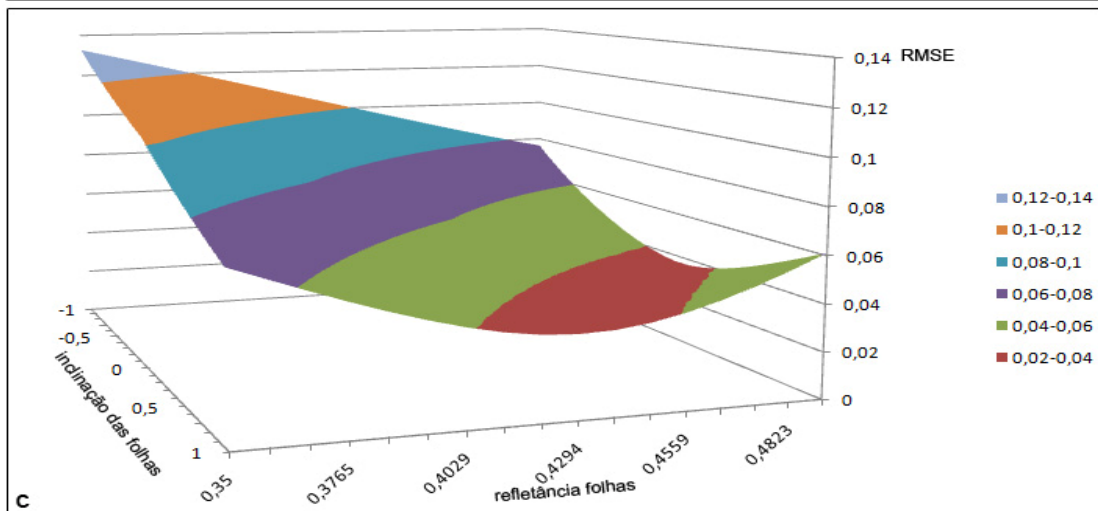
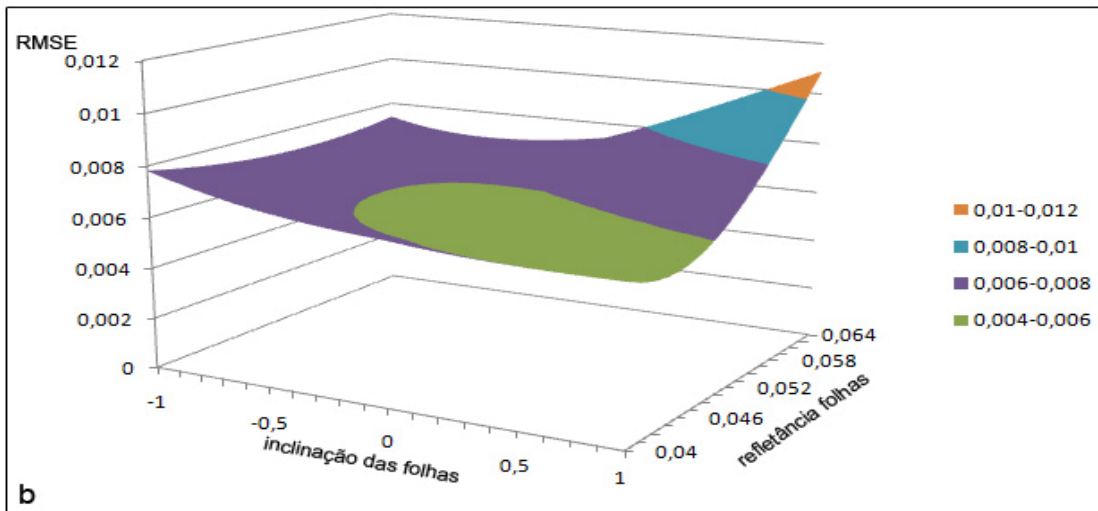
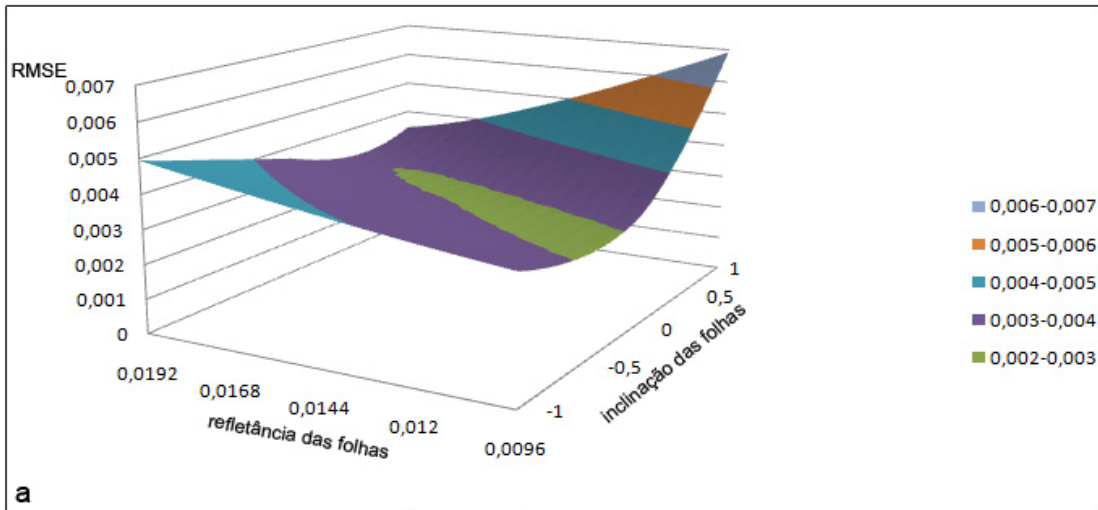


Figura 11 - Valor do RMSE para cada valor de refletância e inclinação das folhas. a - azul; b - vermelho; c - infravermelho próximo

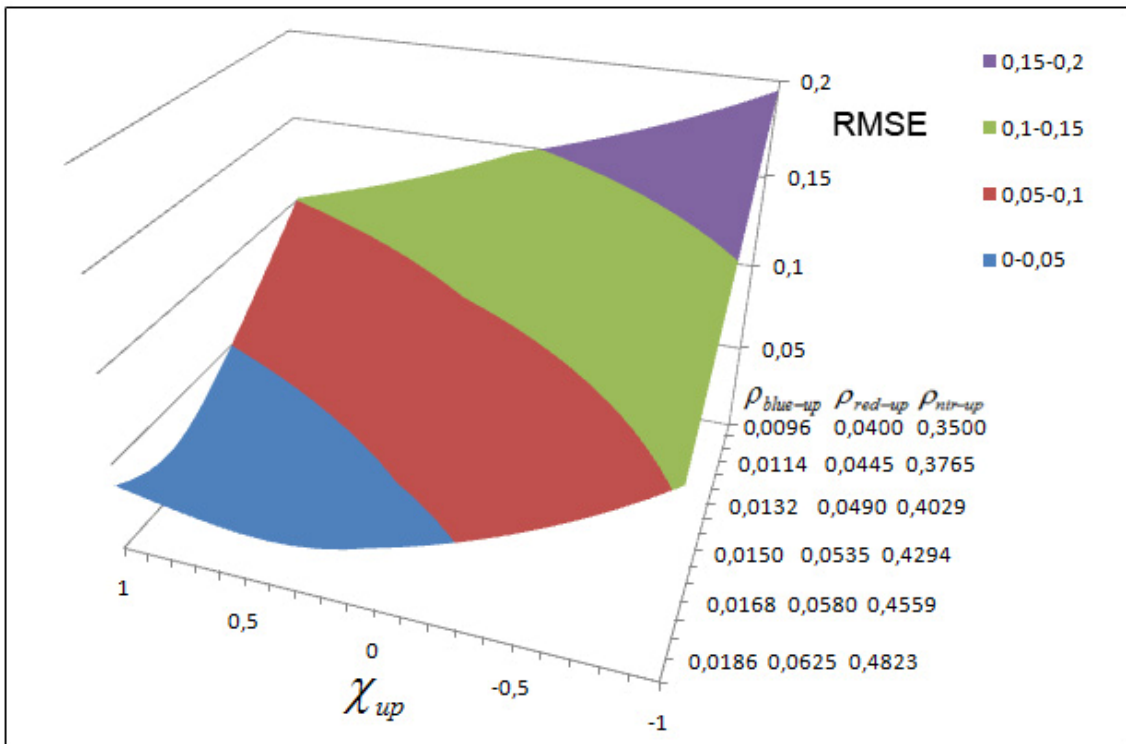


Figura 12 – RMSE dos valores de EVI para as configurações de inclinação das folhas e refletância da folha em cada comprimento de onda do dossel superior.

Yanagi (2006) obteve um χ_{up} igual a 0,86 no estudo da simulação do albedo para a mesmo sítio em estudo, baseando-se nas análises das faixas do VIS e NIR. Por outro lado, Bonan (1996) e Oleson *et al.* (2004) encontraram um valor variando entre -0,4 e 0,6 para o mesmo parâmetro na simulação do albedo do dossel. O valor igual a 0,86 está mais próximo da calibração obtida através de comparação com o EVI.

Os resultados desse trabalho têm a limitação da ausência das campanhas de campo que podem adicionar erros, sendo os dados do MODIS um produto que já possui certa imprecisão.

A Figura 13 mostra os gráficos de dispersão dos dados MODIS e dos simulados para os anos de 2002, 2003 e 2004. Os gráficos indicam a linearidade dos dois dados, quanto mais próximo da reta $y=x$, maior a proximidade dos dados. Os dados mostram também pouca variação interanual.

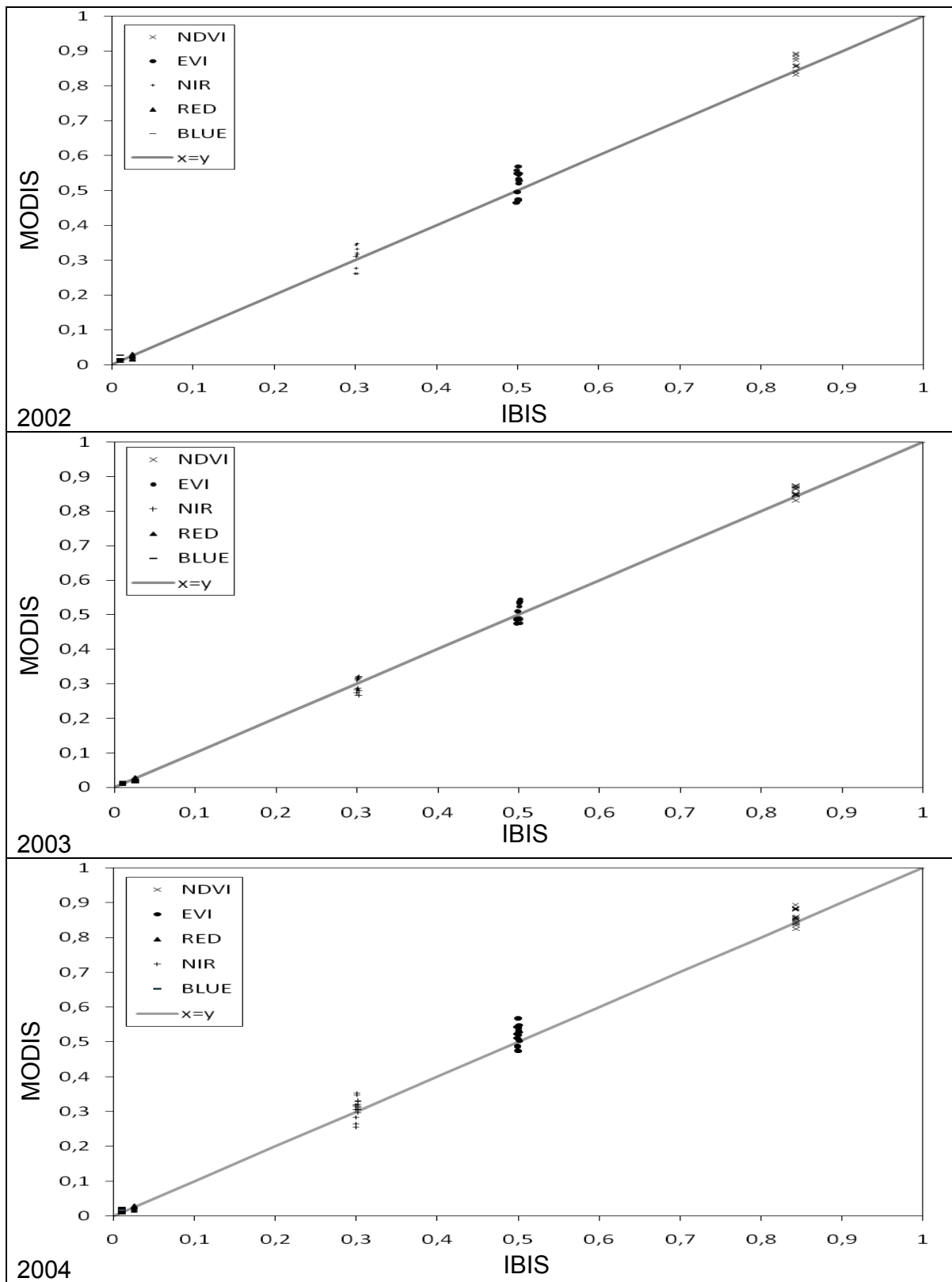


Figura 13 - Dispersão entre os dados MODIS e os obtidos pelo IBIS

5. SUMÁRIO E CONCLUSÕES

Nesse estudo foi avaliada a sensibilidade da refletância nas bandas do azul (460 *nm*), vermelho (650 *nm*) e infravermelho próximo (850 *nm*) simulada pelo modelo IBIS para um conjunto de parâmetros ópticos e arquitetônicos do dossel de uma floresta tropical.

As refletâncias foram avaliadas de acordo com os dados do sensor MODIS, para a reserva biológica de Cuieiras (K34). A análise de sensibilidade indicou forte resposta para os parâmetros referentes à parte superior do dossel. A combinação dos parâmetros para um menor RMSE = 0,0245 foi $\chi_{up} = 0,92$, $\rho_{blue-up} = 0,0162$, $\rho_{red-up} = 0,0466$, $\rho_{nir-up} = 0,4427$ em comparação com o índice de vegetação EVI.

Esse estudo indica o potencial da simulação em faixas menores do espectro eletromagnético para a parte de transferência radiativa do modelo de dinâmica de vegetação IBIS.

Implementar faixas menores de refletância no modelo adiciona a possibilidade de estimar novas características importantes no estudo da vegetação, assim também como o cálculo dos índices de vegetação e outros parâmetros importantes para a modelagem dos sistemas ambientais.

Em estudos futuros, adições de parâmetros como dinâmica do índice de área foliar, possibilitam maior verificação da sazonalidade e aplicação em diferentes biomas. Estudos para áreas maiores é uma ótima prática na área de

modelagem, onde se observaria a resposta da vegetação em cada região com relação às características climáticas nessa região.

Vale ressaltar a importância das campanhas de campo para esse tipo de estudo, sendo essas medidas menos influenciadas pelos constituintes atmosféricos. A união entre modelagem, campanhas de campo e dados de sensoriamento remoto completariam o estudo da refletância para os modelos climáticos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Asner, G. P.; Scurlock J. M. O.; Hicke J. A., 2003. Global synthesis of leaf area index observations: implications for ecological and remote sensing studies. **Global Ecology & Biogeography**. v.12, p.191-205. doi:10.1046/j.1466-822X.2003.00026.x
- Asner, G. P., 1998. Biophysical and Biochemical Sources of Variability in Canopy Reflectance. **Remote Sensing of Environment**. v.64, p.234-253. doi: 10.1016/S0034-4257(98)00014-5
- Bonan, G. B., 1996. A Land surface model (LSM version 1.0) for ecological, hydrological, and atmospheric studies: technical description and user's guide. **NCAR Technical note** TN-417+STR, 150p.
- Chambers, J.; Asner, G.; Morton, D.; Anderson, L. O.; Saatchi, S.; Espírito-Santo, F.; Palace, M.; Souza Jr., C., 2007. Regional Ecosystem Structure and Function: Ecological Insights from Remote Sensing of Tropical Forests. **Trends in Ecology and Evolution**. v.22, n.8, p.414-423. doi:10.1016/j.tree.2007.05.001
- Dawson, T. P.; Curran, P. J.; Plummer, S. E., 1998. LIBERTY - Modeling the Effects of Leaf Biochemical Concentration on Reflectance Spectra. **Remote Sensing of Environment**. v.65, p.50-60. doi:10.1016/S0034-4257(98)00007-8
- Dickinson, R. E., 1983. Land surface processes and climate-surface albedos and energy balance. **Advances in Geophysics**. v.25, p.305-353.
- Dickinson, R. E.; Tian, Y.; Liu Q.; Zhou L. 2008. Dynamics of leaf area for climate and weather models. **Journal of Geophysical Research**. v.113. doi:10.1029/2007JD008934.

- Foley, J. A.; Prentice, I. C.; Ramankutty, N.; Levis, S.; Pollard, D.; Sitch, S.; Haxeltine, A., 1996. An integrated biosphere model of land surface processes. **Global Biogeochemical Cycles**. v.10, p.603-628. doi:10.1029/96GB02692
- Goel, N. S., 1988. Models of vegetation canopy reflectance and their use in estimation of biophysical parameters from reflectance data. **Remote Sensing Reviews**. Great Britain, v.4, n.1, p.1-212.
- Huete, A. R.; Didan, K.; Miura, T.; Rodriguez, E. P.; Gao, X.; Ferreira, L. G., 2002. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. **Remote Sensing of Environment**. v.83, p.195-213. doi: 10.1016/S0034-4257(02)00096-2
- Huete, A.R.; Didan, K.; Shimabukuro, Y. E.; Ratana, P.; Saleska, S. R.; Hutyra, L.H.; Yang, W.; Nemani, R.R.; Mynemi, R., 2006. Amazon rainforests green-up sunlight in dry season. **Geophysical Research Letters**. v.33. doi:10.1029/2005GL025583
- Huete A. R.; Huemmrich, K. F.; Miura T.; Xiao, X.; Didan, K.; Leeuwen, W.; Hall, F.; Tucker, C. J., 2006. Vegetation Index greenness global data set. NASA ESDR/CDR.
- Ichii, K.; Hashimoto, H. F.; White, M.; Potter, C.; Hutyra, L. R.; Huete, A. R.; Myneni, R. B.; Nemani, R. R., 2007. Constraining rooting depths in tropical rainforests using satellite data and ecosystem modeling for accurate simulation of gross primary production seasonality. **Global Change Biology**. v.13, p.67-77. doi: 10.1111/j.1365-2486.2006.01277.x
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), 2007. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Paris.
- Jensen, J. R., 2000. Multispectral Remote Sensing Systems. In:_____. Remote Sensing of the Environment an earth resource perspective. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, cap.7, p.181-240.
- Justice, C. O.; Townshed, J. R. G.; Vermote, E. F.; Masuoka, E.; Wolfe, R. E.; Saleous, N.; Roy, D. P.; Morisette, J. T., 2002. An overview of MODIS land data processing and products status. **Remote Sensing of Environment**. v.83, n.1, p.3-15. doi: 10.1016/S0034-4257(02)00084-6
- Knipling, E. B., 1970. Physical and Physiological Basis for the Reflectance of Visible and Near – Infrared Radiation from Vegetation. **Remote Sensing of Environment**. p.155-159.

- Kobayashi, H.; Dye, D. G., 2005. Atmospheric conditions for monitoring the long-term vegetation dynamics in the Amazon using normalized difference vegetation index. **Remote Sensing of Environment**. v.97, p.519-525. doi:10.1016/j.rse.2005.06.007
- Latorre, M. L.; Anderson, L. O.; Shimabukuro, Y. E.; Carvalho Junior, O. A., 2003. Sensor MODIS: Características gerais e aplicações. **Espaço e Geografia**. v.16, n.1, p.97-126.
- Liang, S.; Fang, H.; Chen, M.; Shuey, C. J.; Walthall, C.; Doughtry, C.; Morisette, J.; Schaaf, A., 2002. Validating MODIS land surface and albedo products: methods and preliminary results. **Remote Sensing of Environment**. v.83, p.149-162. doi:10.1016/S0034-4257(02)00092-5
- Liu, Q.; Gu, L.; Dickinson, R. E.; Tian, Y.; Zhou, L.; Post, W. M., 2008. Assimilation of satellite reflectance data into a dynamical leaf model to infer seasonally varying leaf areas for climate and carbon models. **Journal of Geophysical Research**. v.113. doi:10.1029/2007JD009645.
- MODIS Land. Disponível em: <http://modis-land.gsfc.nasa.gov>, acesso em abril de 2008.
- Mulkey, S. S.; Kitajima, K.; Wright, S. J., 1996. Plant Physiological Ecology of Tropical Forest Canopies. **Tree**. v.11, n.10. doi:10.1016/0169-5347(96)10043-4
- Oleson, K. W.; Dai, Y.; Bonan, G. B.; Bosilovich, M.; Dickinson, R.; Dirmeyer, P.; Hoffman, F.; Houser, P.; Levis, S.; Niu, G-Y.; Thornton, P.; Vertenstein, M.; Yang, Z.- L.; Zeng, X., 2004. Technical description of the Community Land Model (CLM). **NCAR Technical note**. p.174.
- Parkinson, C. L.; Greenstone, E., 2000. EOS data products handbook. Maryland: NASA, v.2, p.253.
- Ponzoni, F. J.; Shimabukuro, Y. E., 2007. Sensoriamento Remoto no Estudo da Vegetação. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, NJ: Parêntese, cap.1, p.5-40.
- Price, J. C.; Bausch, W. C., 1995. Leaf Area Index Estimation from Visible and Near-Infrared Reflectance Data. **Remote Sensing of Environment**. v.52, p.55-65. doi:10.1016/0034-4257(94)00111-Y
- Sellers, P. J., 1985. Canopy reflectance, photosynthesis and transpiration. **International Journal of Remote Sensing**. v.6, p.1335-1372. doi:10.1080/01431168508948283

- Yanagi, S. N. M., 2006. Modeling Radiative Transfer in Tropical Rainforest Canopies: Sensitivity of Simulated Albedo to Canopy Architectural Parameters. Dissertação de Doutorado em Meteorologia Agrícola. Viçosa.
- Zhang, X.; Friedl, M. A.; Schaaf, C. B.; Strahler, A. H.; Hodges, J. C. F.; Gao, F.; Reed, B. C.; Huete, A., 2003. Monitoring vegetation phenology using MODIS. **Remote Sensing of Environment**. v.84, p.414-423. doi:10.1016/S0034-4257(02)00135-9
- Xiao, X.; Hagen, S.; Zhang, Q.; Keller, M.; Moore, B., 2006. Detecting leaf phenology of seasonally moist tropical forests in South America with multi-temporal MODIS images. **Remote Sensing of Environment**. v.103, p.465-473. doi:10.1016/j.rse.2006.04.013