



Ministério da
Ciência e Tecnologia



sid.inpe.br/mtc-m19/2011/03.25.19.13-TDI

INFLUÊNCIA DA GEOMETRIA DE AQUISIÇÃO SOBRE ÍNDICES DE VEGETAÇÃO E ESTIMATIVAS DE IAF COM DADOS MODIS, HYPERION E SIMULAÇÕES PROSAIL PARA A SOJA

Fábio Marcelo Breunig

Tese de Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto,
orientada pelos Drs. Lênio Soares Galvão, e Antonio Roberto Formaggio, aprovada
em 14 de março de 2011.

URL do documento original:

[<http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/39D8T88>](http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/39D8T88)

INPE
São José dos Campos
2011

PUBLICADO POR:

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE

Gabinete do Diretor (GB)

Serviço de Informação e Documentação (SID)

Caixa Postal 515 - CEP 12.245-970

São José dos Campos - SP - Brasil

Tel.:(012) 3208-6923/6921

Fax: (012) 3208-6919

E-mail: pubtc@sid.inpe.br

CONSELHO DE EDITORAÇÃO E PRESERVAÇÃO DA PRODUÇÃO INTELLECTUAL DO INPE (RE/DIR-204):**Presidente:**

Dr. Gerald Jean Francis Banon - Coordenação Observação da Terra (OBT)

Membros:

Dr^a Inez Staciari Batista - Coordenação Ciências Espaciais e Atmosféricas (CEA)

Dr^a Maria do Carmo de Andrade Nono - Conselho de Pós-Graduação

Dr^a Regina Célia dos Santos Alvalá - Centro de Ciência do Sistema Terrestre (CST)

Marciana Leite Ribeiro - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Dr. Ralf Gielow - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPT)

Dr. Wilson Yamaguti - Coordenação Engenharia e Tecnologia Espacial (ETE)

Dr. Horácio Hideki Yanasse - Centro de Tecnologias Especiais (CTE)

BIBLIOTECA DIGITAL:

Dr. Gerald Jean Francis Banon - Coordenação de Observação da Terra (OBT)

Marciana Leite Ribeiro - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Deicy Farabello - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPT)

REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:

Marciana Leite Ribeiro - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Yolanda Ribeiro da Silva Souza - Serviço de Informação e Documentação (SID)

EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:

Vivêca Sant'Ana Lemos - Serviço de Informação e Documentação (SID)



Ministério da
Ciência e Tecnologia



sid.inpe.br/mtc-m19/2011/03.25.19.13-TDI

INFLUÊNCIA DA GEOMETRIA DE AQUISIÇÃO SOBRE ÍNDICES DE VEGETAÇÃO E ESTIMATIVAS DE IAF COM DADOS MODIS, HYPERION E SIMULAÇÕES PROSAIL PARA A SOJA

Fábio Marcelo Breunig

Tese de Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto,
orientada pelos Drs. Lênio Soares Galvão, e Antonio Roberto Formaggio, aprovada
em 14 de março de 2011.

URL do documento original:

[<http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/39D8T88>](http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/39D8T88)

INPE
São José dos Campos
2011

Breunig, Fábio Marcelo.
B757i Influência da geometria de aquisição sobre índices de vegetação
e estimativas de IAF com dados MODIS, Hyperion e simulações
PROSAIL para a soja / Fábio Marcelo Breunig. – São José dos
Campos : INPE, 2011.
xxxviii+210 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m19/2011/03.25.19.13-TDI)

Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) – Instituto
Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2011.
Orientadores : Drs. Lênio Soares Galvão, e Antonio Roberto
Formaggio.

1. Sensoriamento remoto. 2. Simulações. 3. Transferência radi-
ativa. 4. Efeitos direcionais. 5. Reflectância . I.Título.

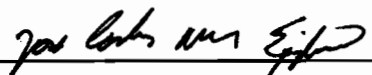
CDU 528.871 (817.2)

Copyright © 2011 do MCT/INPE. Nenhuma parte desta publicação pode ser reproduzida, armazenada em um sistema de recuperação, ou transmitida sob qualquer forma ou por qualquer meio, eletrônico, mecânico, fotográfico, reprográfico, de microfilmagem ou outros, sem a permissão escrita do INPE, com exceção de qualquer material fornecido especificamente com o propósito de ser entrado e executado num sistema computacional, para o uso exclusivo do leitor da obra.

Copyright © 2011 by MCT/INPE. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording, microfilming, or otherwise, without written permission from INPE, with the exception of any material supplied specifically for the purpose of being entered and executed on a computer system, for exclusive use of the reader of the work.

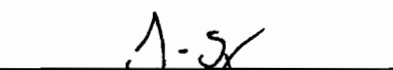
**Aprovado (a) pela Banca Examinadora
em cumprimento ao requisito exigido para
obtenção do Título de Doutor(a) em
Sensoriamento Remoto**

Dr. José Carlos Neves Epiphanyo



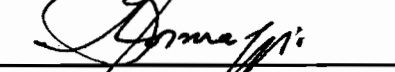
Presidente / INPE / SJC Campos - SP

Dr. Lênio Soares Galvão



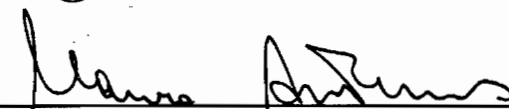
Orientador(a) / INPE / SJC Campos - SP

Dr. Antonio Roberto Formaggio



Orientador(a) / INPE / SJC Campos - SP

Dr. Mauro Antonio Homem Antunes



Convidado(a) / UFRRJ / Seropédica - RJ

Dr. Rodrigo Rizzi



Convidado(a) / UFPel / Capão do Leão - RS

Aluno (a): Fábio Marcelo Breuning

São José dos Campos, 14 de março de 2011

Os desafios são fonte primeira das realizações.

À minha família e amigos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Comissão de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP; projeto número 2008/11499-8) pelo apoio financeiro prestado para a realização da Tese.

Ao Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) pela oportunidade de realizar o Mestrado, bem como pelo apoio em infraestrutura oferecido ao longo do curso.

Ao Grupo André Maggi por permitir o estudo em suas fazendas e pelo fornecimento dos dados agronômicos da soja.

Aos membros da banca de avaliação pelas contribuições para o melhoramento da Tese.

Aos Drs. Lênio Soares Galvão e Antônio Roberto Formaggio pela excelente orientação oferecida, conhecimentos transferidos e amizade desenvolvida.

Aos demais professores do Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto pelo auxílio prestado para o esclarecimento de dúvidas.

Aos colegas e amigos pelo apoio, auxílio e amizade.

RESUMO

Para reduzir os efeitos de cobertura de nuvens sobre a aquisição de imagens ópticas, a resolução temporal dos satélites tem sido melhorada para o acompanhamento adequado dos cultivos agrícolas com o uso de sensores de ampla faixa de imageamento, como o *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS). O MODIS adquire dados sobre um mesmo alvo agrícola com direções de espalhamento e ângulos de visada distintos em um curto espaço de tempo. A visada fora do nadir fornece informações importantes para a geração de produtos usando modelos físicos, mas também introduz variabilidade na resposta espectral dos cultivos quando imagens diárias são analisadas. Mesmo o sensor hiperespectral Hyperion, que imageia uma área relativamente pequena (7,7 x 50 km) da superfície terrestre, pode ter seu tempo de revisita melhorado por apontamento lateral. Desta forma, o estudo de alvos agrícolas com sensores como o MODIS deve necessariamente considerar os efeitos direcionais (retroespalhamento e espalhamento frontal) resultantes da geometria de iluminação e de visada. O objetivo desta pesquisa foi avaliar as implicações dos efeitos direcionais, considerando diferentes ângulos de visada, sobre a reflectância de dosséis de soja em distintos estádios de desenvolvimento, com dados do sensor multiespectral MODIS, hiperespectral Hyperion e simulações da reflectância com o modelo de transferência radiativa PROSAIL. Selecionou-se uma grande área de soja localizada no município de Querência (MT). Foram avaliados dois anos-safra: 2004-2005 e 2005-2006. Inicialmente, em caráter exploratório, o modelo PROSAIL foi utilizado para avaliar a influência de diferentes parâmetros dos dosséis de soja (p.ex., índice de área foliar (IAF)) e de geometria de aquisição de dados (p.ex., ângulo zenital de visada (AZV); ângulo zenital solar (AZS); ângulo azimutal relativo (AAR)) sobre a reflectância e índices de vegetação. Os demais parâmetros do modelo foram mantidos constantes. Com base na análise de imagens MODIS diárias (produto MOD09), o impacto dos efeitos direcionais sobre os espectros de reflectância de diferentes variedades da soja foi avaliado em função do estágio de desenvolvimento da cultura. Na sequência, a dependência dos índices de vegetação (*Normalized Difference Vegetation Index* - NDVI; *Enhanced Vegetation Index* - EVI; *modified Normalized Difference Water Index* - NDWI) dos efeitos direcionais foi avaliada. Foi utilizado o teste estatístico não paramétrico de Wilcoxon e uma normalização direcional entre índices de vegetação, determinados para as direções do retroespalhamento e espalhamento frontal, para identificar os índices de vegetação menos afetados pelo AZV. Por fim, foi feita a avaliação da influência dos efeitos direcionais sobre as estimativas de IAF derivadas de modelos empíricos, baseados na relação entre NDVI e IAF. Os resultados das simulações no PROSAIL mostraram que a reflectância na direção do retroespalhamento (predominância de componentes iluminados do dossel sendo vistos pelo sensor) foi maior do que a reflectância da direção do espalhamento frontal (predominância de sombra). A avaliação dos índices de vegetação mostrou que, mesmo com o aumento do IAF, os efeitos direcionais estiveram presentes. A comparação entre os espectros de reflectância das simulações no PROSAIL e os espectros reais do MODIS mostrou que o PROSAIL subestimou a magnitude dos efeitos direcionais. Contudo, à medida que o IAF aumentou, a semelhança entre ambos os espectros de reflectância reais e simulados foi maior. Com base nas imagens de

reflectância diárias do MODIS, verificou-se que o AZV pode gerar diferenças de até 20% na reflectância da banda do infravermelho próximo (IVP). Quando o dossel da soja fechou, a reflectância foi menos influenciada pelo AZV do MODIS. Resultados da avaliação dos índices de vegetação mostraram que o NDVI e o *Greenness Normalized Difference Vegetation Index* (GNDVI) foram menos sensíveis aos efeitos direcionais do que os demais índices. Por outro lado, o EVI e os índices que exploram a relação entre o IVP e o infravermelho de ondas curtas (NDWI₁₆₄₀ e NDWI₂₁₂₀) apresentaram uma maior dependência do AZV do MODIS. O NDVI obtido da direção do espalhamento frontal foi sempre superior ao derivado da imagem de retroespalhamento, mas o contrário foi observado para o EVI. Esse resultado está associado às maiores dependências do NDVI e EVI das bandas do vermelho e do IVP, respectivamente. O "Algoritmo Principal" (modelo de transferência radiativa), utilizado na geração do produto IAF (MOD15A2), foi gradualmente substituído pelo "Algoritmo Backup" (modelo empírico) com o desenvolvimento fenológico da soja, período que é coincidente com a frequência máxima de cobertura de nuvens. As estimativas de IAF dos modelos empíricos, considerando um mesmo estágio fenológico da soja e pares de imagens MODIS adquiridas em dias consecutivos, mas com ângulos zenitais de visada opostos, apresentaram maiores valores de IAF na direção do espalhamento frontal do que na de retroespalhamento. As maiores diferenças ocorreram para a faixa de NDVI entre 0,70 e 0,85 (faixa crítica). Os resultados mostraram diferenças de IAF de até 3,2 quando um modelo empírico "global" foi utilizado, que foram reduzidas para valores de até 1,5 quando um modelo empírico "local" foi utilizado. Decorrentes de fatores como cobertura de nuvens e geometria de visada, recomendam-se cuidados na utilização dos produtos MODIS e de suas imagens diárias para o estudo da soja, apesar da alta resolução temporal deste sensor.

INFLUENCE OF DATA ACQUISITION GEOMETRY ON VEGETATION INDICES AND LAI ESTIMATES WITH MODIS, HYPERION AND PROSAIL SIMULATIONS FOR SOYBEAN

ABSTRACT

In order to reduce cloud cover effects on the acquisition of optical images, the temporal resolution of the satellites can be improved by using large swath width sensors such as the Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS). MODIS acquires data over a given agricultural area with distinct view directions and angles in a short period of time. The off-nadir viewing provides important data to generate products using radiative transfer models, but it also introduces variability in the crop spectral response, especially when daily images are analysed. Even the hyperspectral Hyperion sensor, which acquires images over comparatively small areas (7.7 x 50 km) at nadir, can have its revisit time improved through side looking. Thus, crop studies using MODIS must consider directional effects (backscattering and forward scattering) resultant from the illumination-viewing geometry. The objective of this research was to evaluate directional effects, considering also different illumination and view configurations, on the reflectance of soybean canopies observed in distinct phenological stages. For this purpose, data acquired by MODIS and Hyperion, and reflectance simulation from the radiative transfer model PROSAIL, were used. A large soybean area located in Querência municipality, in Mato Grosso state (Brazil), was selected as study area. Two growing seasons were studied: 2004-2005 and 2005-2006. Initially, the PROSAIL was used to evaluate the influence of different soybean canopy parameters (e.g., leaf area index - LAI) and of distinct geometries of data acquisition (e.g., view zenith angle (VZA); solar zenith angle (SZA); relative azimuth angle (RAA) on the reflectance and vegetation indices. The other model parameters were kept constant. Using MODIS daily images (product MOD09), the impact of the directional effects on reflectance spectra of different soybean varieties were evaluated as a function of the crop development. Subsequently, the vegetation index (e.g., Normalized Difference Vegetation Index - NDVI; Enhanced Vegetation Index - EVI; modified Normalized Difference Water Index - NDWI) dependence on the directional effects was evaluated. The Wilcoxon non-parametric statistical test and a directional normalization of these indices, determined for backscattering and forward scattering, were used to identify the less sensible vegetation indices to VZA. Finally, the impact of the directional effects on LAI derived from empirical models, based on the relationship between NDVI and LAI, was performed. Results from PROSAIL simulations showed that the reflectance of the backscattering direction (predominance of sunlit canopy components viewed by the sensor) was higher than the reflectance of the forward scattering direction (predominance of shadow). Despite the LAI increase, the evaluation of the vegetation indices showed that the directional effects were still present. The comparison between the reflectance spectra simulated through PROSAIL and the observed MODIS reflectance spectra showed that PROSAIL underestimated the magnitude of the directional effects. However, as LAI increased, the similarity between both simulated

and observed spectra was higher. Based on MODIS daily reflectance images, it was verified that the VZA can generate differences up to 20 % in the near infrared (NIR) reflectance. With the soybean canopy closure, the reflectance was less affected by the MODIS VZA. Results showed that NDVI and Greenness Normalized Difference Vegetation Index (GNDVI) were lesser sensible to directional effects and VZA than EVI and the remaining indices based on the NIR and short wave infrared (NDWI₁₆₄₀ e NDWI₂₁₂₀). The NDVI retrieved from the forward scattering direction was always higher than that derived from the backscattering viewing, but the contrary was observed for EVI. This result is associated with the higher dependence of NDVI on the red reflectance and of EVI on the NIR reflectance. The "Main Algorithm" (radiative transfer modelling) used in the generation of the MODIS LAI Product (MOD15A2) was gradually replaced by the "Backup Algorithm" (empirical modelling) with the soybean development, which is coincident with the peak of regional cloud cover. When the same soybean phenological stage and MODIS images acquired at consecutive days and in opposite view zenith angles were considered in the analysis, LAI estimates from empirical models presented larger values in the forward scattering than in the backscattering viewing. The largest LAI differences were found for NDVI values ranging from 0.70 to 0.85 (critical range). Results showed differences up to 3.2 when the "global" empirical model was used, which were reduced to values up to 1.5 when the "local" empirical model was utilized. In spite of the high temporal resolution of MODIS, due to factors such as cloud cover and viewing geometry, care is necessary when using their products and daily images for soybean studies.

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
Figura 2.1 – Soja no Brasil. (a) Densidade da produção de soja no Brasil; (b) Evolução da área cultivada das principais culturas agrícolas nacionais.....	8
Figura 2.2 – Ilustração dos ângulos da (a) geometria de iluminação - AZS (b) e visada - AZV. Fonte: Adaptado de LEWICKI et al. (2004).....	23
Figura 2.3 – Evolução da cobertura do solo em áreas agrícolas. (a) solo exposto antes do plantio; (b) solo exposto com orientação de plantio; (c) culturas perenes após o brotamento; (d) culturas perenes em médio desenvolvimento; (e) culturas perenes com dossel fechado/completo.	29
Figura 2.4 - Coeficientes de absorção específicos das clorofilas <i>a</i> e <i>b</i> utilizados no modelo PROSAIL.....	40
Figura 2.5 – Coeficientes de absorção específicos dos carotenóides utilizados no modelo PROSAIL.....	40
Figura 2.6 - Coeficientes de absorção específico dos pigmentos marrons utilizados no modelo PROSAIL. (au) = unidades arbitrárias.	41
Figura 2.7 - Coeficientes de absorção específicos da água utilizados no modelo PROSAIL.....	42
Figura 2.8 - Coeficiente de absorção específico do conteúdo de matéria seca utilizado no modelo PROSAIL.....	42
Figura 3.1 - Fluxograma de atividades desenvolvidas durante a pesquisa.....	45
Figura 3.2 – Localização da área de estudo no município de Querência no Estado do Mato Grosso (MT) e identificação das quatro fazendas estudadas (A – Tanguro; B – Alvorada; C – Anta; D - Mutum). A composição colorida foi obtida com imagens adquiridas pelo sensor sino-brasileiro CCD/CBERS-2 (bandas 4, 3 e 2 em RGB) de 21/01/2006.....	46
Figura 3.3 – Fluxograma das etapas da simulação com o PROSAIL para avaliação dos efeitos da geometria de iluminação e de visada sobre dosséis de soja.	54

Figura 3.4 – Sequência do estudo da influência do ângulo zenital de visada (AZV) sobre a reflectância de superfície e índices de vegetação derivados do sensor MODIS.	60
Figura 3.5 – Sequência do estudo da influência do ângulo zenital de visada e de iluminação sobre as estimativas de IAF através de modelos empíricos.....	66
Figura 3.6 – Fluxograma de integração e discussão dos resultados.....	70
Figura 4.1 – Comparação entre os espectros medidos e simulados de reflectância da variedade de soja Perdiz do ano safra 2004-2005. A imagem Hyperion foi obtida em 8 de fevereiro de 2005 na direção do espalhamento frontal (AZV = - 21,5°), com AZS de 31° e com AAR de -64°	72
Figura 4.2 – Efeito do fator hot spot na reflectância na banda do (a) vermelho e do (b) IVP. O AZS foi fixado em 30°.....	73
Figura 4.3 – Variação da reflectância em função do índice de área foliar (IAF) com base nos resultados do modelo PROSAIL com parâmetros biofísicos ajustados para a variedade Perdiz (safra 2004-2005).	74
Figura 4.4 – Variação da reflectância em função da distribuição angular de folhas (DAF) com base nos resultados do modelo PROSAIL com parâmetros biofísicos ajustados para a variedade Perdiz (safra 2004-2005). O valor de IAF utilizado na simulação foi 5.	75
Figura 4.5 – Efeito do Ângulo Azimutal Relativo (AAR) sobre a reflectância simulada pelo PROSAIL da banda do vermelho (660 nm) para distintos IAF. Foi considerado um Ângulo Zenital de Visada (AZV) de 26° (retroespalhamento) e um Ângulo Zenital Solar (AZS) de 30°. O plano de 0° até ±180° no eixo x indica o plano principal de espalhamento. As ondulações entre os distintos IAF são resultantes do interpolador (krigeagem).....	76
Figura 4.6 – Efeito do Ângulo Azimutal Relativo (AAR) sobre a reflectância simulada pelo PROSAIL da banda do IVP (860 nm) para distintos IAF. Foi considerado um Ângulo Zenital de Visada (AZV) de 26° (retroespalhamento) e um Ângulo Zenital Solar (AZS) de 30°. O plano de 0° até ±180° no eixo x indica o plano principal de espalhamento. As	

ondulações entre os distintos IAF são resultantes do interpolador (krigeagem).....	77
Figura 4.7– Efeito do Ângulo Azimutal Relativo (AAR) sobre a reflectância simulada pelo PROSAIL normalizada para o nadir (ANIF) da banda do vermelho (660 nm) para distintos valores de IAF. Foi considerado um Ângulo Zenital de Visada (AZV) de 26° (retroespalhamento) e um Ângulo Zenital Solar (AZS) de 30°. O plano de 0° até ±180° no eixo x indica o plano principal de espalhamento.	78
Figura 4.8 - Efeito do Ângulo Azimutal Relativo (AAR) sobre a reflectância simulada pelo PROSAIL normalizada para o nadir (ANIF) da banda do IVP (860 nm) para distintos valores de IAF. Foi considerado um Ângulo Zenital de Visada (AZV) de 26° (retroespalhamento) e um Ângulo Zenital Solar (AZS) de 30°. O plano de 0° até ±180° no eixo x indica o plano principal de espalhamento.	79
Figura 4.9 – Ilustração da configuração geométrica simulada para (a) variações do AZV e(b) AZS, variando de -70° a 70°, nas direções do espalhamento frontal e retroespalhamento.	80
Figura 4.10 – Efeito do Ângulo Zenital de Visada (AZV) sobre a reflectância simulada pelo PROSAIL da banda do vermelho (660 nm) normalizada (ANIF) em função do IAF. As direções do espalhamento frontal (em cinza e AZV negativos) e do retroespalhamento (branco e AZV positivos) estão indicadas. O Ângulo Azimutal Relativo (AAR) foi mantido fixo em zero (plano principal de espalhamento). O Ângulo Zenital Solar foi mantido fixo em 30°.....	81
Figura 4.11 – Efeito do Ângulo Zenital de Visada (AZV) sobre a reflectância simulada pelo PROSAIL da banda do Azul (466 nm) normalizada (ANIF) em função do IAF. As direções do espalhamento frontal (em cinza e AZV negativos) e do retroespalhamento (branco e AZV positivos) estão indicadas. O Ângulo Azimutal Relativo (AAR) foi mantido fixo em zero (plano principal de espalhamento). O Ângulo Zenital Solar foi mantido fixo em 30°.....	82

- Figura 4.12 – Efeito do Ângulo Zenital de Visada (AZV) sobre a reflectância simulada pelo PROSAIL da banda do IVP (860 nm) normalizada (ANIF) em função do IAF. As direções do espalhamento frontal (em cinza e AZV negativos) e do retroespalhamento (branco e AZV positivos) estão indicadas. O Ângulo Azimutal Relativo (AAR) foi mantido fixo em zero (plano principal de espalhamento). O Ângulo Zenital Solar foi mantido fixo em 30°. 83
- Figura 4.13 – Resultado das simulações no PROSAIL da reflectância simulada pelo PROSAIL para a banda do (a) azul, (b) verde, (c) vermelho, (d) IVP, (e) SWIR 1240 nm e (f) SWIR 2120 nm em função do AZV e do AZS. Simulações feitas com IAF de 5. As direções do espalhamento frontal (parte de baixo da linha 1:1) e do retroespalhamento (parte de cima da linha 1:1) estão indicadas na figura. O Ângulo Azimutal Relativo (AAR) foi mantido fixo em zero (plano principal de espalhamento). 84
- Figura 4.14 – Efeito do Ângulo Zenital Solar (AZS) sobre a reflectância simulada pelo PROSAIL da banda do azul (466 nm) em função do IAF. As direções do espalhamento frontal (em cinza e AZS negativos) e do retroespalhamento (branco e AZS positivos) estão indicadas. O Ângulo Azimutal Relativo (AAR) foi mantido fixo em zero (plano principal de espalhamento). O Ângulo Zenital de Visada foi mantido fixo em 30°. 85
- Figura 4.15 – Efeito do Ângulo Zenital Solar (AZS) sobre a reflectância simulada pelo PROSAIL da banda do vermelho (660 nm) em função do IAF. As direções do espalhamento frontal (em cinza e AZS negativos) e do retroespalhamento (branco e AZS positivos) estão indicadas na figura. O Ângulo Azimutal Relativo (AAR) foi mantido fixo em zero (plano principal de espalhamento). O Ângulo Zenital de Visada foi mantido fixo em 30°. 86
- Figura 4.16 – Efeito do Ângulo Zenital Solar (AZS) sobre reflectância simulada pelo PROSAIL da banda do IVP (860 nm) em função do IAF. As direções do espalhamento frontal (em cinza e AZS negativos) e do retroespalhamento (branco e AZS positivos) estão indicadas na figura. O Ângulo Azimutal Relativo (AAR) foi mantido fixo em zero (plano principal

de espalhamento). O Ângulo Zenital de Visada foi mantido fixo em 30°.....	87
Figura 4.17 – Resultado das simulações no PROSAIL da reflectância simulada pelo PROSAIL para as bandas do (a) azul, (b) vermelho, (c) IVP e (d) SWIR 1240 nm em função do AZV e do AZS. Simulações feitas com IAF de 1. As direções do espalhamento frontal (parte de baixo da linha 1:1) e do retroespalhamento (parte de cima da linha 1:1) estão indicadas na figura. O Ângulo Azimutal Relativo (AAR) foi mantido fixo em zero (plano principal de espalhamento).	88
Figura 4.18 – Efeito do Ângulo Zenital de Visada (AZV) sobre o NDVI normalizado (ANIF) em função do IAF. As direções do espalhamento frontal (em cinza e AZV negativos) e do retroespalhamento (branco e AZV positivos) estão indicadas na figura. O Ângulo Azimutal Relativo (AAR) foi mantido fixo em zero (plano principal de espalhamento). O Ângulo Zenital Solar foi mantido fixo em 30°.	89
Figura 4.19 – Variação do NDVI em função do ângulo zenital de visada (AZV) e do ângulo zenital solar (AZS). As direções do espalhamento frontal (parte de baixo da linha 1:1) e do retroespalhamento (parte de cima da linha 1:1) estão indicadas na figura. O Ângulo Azimutal Relativo (AAR) foi mantido fixo em zero (plano principal de espalhamento). Avaliação feita com base num IAF de 5.	90
Figura 4.20 – Efeito do Ângulo Zenital de Visada (AZV) sobre o EVI normalizado (ANIF) em função do IAF. As direções do espalhamento frontal (em cinza e AZV negativos) e do retroespalhamento (branco e AZV positivos) estão indicadas na figura. O Ângulo Azimutal Relativo (AAR) foi mantido fixo em zero (plano principal de espalhamento). O Ângulo Zenital Solar foi mantido fixo em 30°.	91
Figura 4.21 - Variação do EVI em função do ângulo zenital de visada (AZV) e do ângulo zenital solar (AZS). As direções do espalhamento frontal (parte de baixo da linha 1:1) e do retroespalhamento (parte de cima da linha 1:1) estão indicadas na figura. O Ângulo Azimutal Relativo (AAR) foi mantido fixo em zero (plano principal de espalhamento). Avaliação feita com base	

num IAF de 5.	92
Figura 4.22 - Efeito do Ângulo Zenital de Visada (AZV) sobre o (a) NDWI e (b) NDWI normalizado (ANIF) em função do IAF. As direções do espalhamento frontal (em cinza e AZV negativos) e do retroespalhamento (branco e AZV positivos) estão indicadas na figura. O Ângulo Azimutal Relativo (AAR) foi mantido fixo em zero (plano principal de espalhamento). O Ângulo Zenital Solar foi mantido fixo em 30°.....	93
Figura 4.23 – Variação do NDWI em função do ângulo zenital de visada (AZV) e do ângulo zenital solar (AZS). As direções do espalhamento frontal (parte de baixo da linha 1:1) e do retroespalhamento (parte de cima da linha 1:1) estão indicadas na figura. O Ângulo Azimutal Relativo (AAR) foi mantido fixo em zero (plano principal de espalhamento). Avaliação feita com base num IAF de 5.	94
Figura 4.24 – Efeito do Ângulo Zenital de Visada (AZV) sobre a normalização do (a) GNDVI (Gitelson et al., 1996), (b) EVI-2 (Jiang et al., 2008), (c) NDWI ₁₆₄₀ e (d) NDWI ₂₁₂₀ , em função do IAF. As direções do espalhamento frontal (em cinza e AZV negativos) e do retroespalhamento (branco e AZV positivos) estão indicadas na figura. O Ângulo Azimutal Relativo (AAR) foi mantido fixo em zero (plano principal de espalhamento). O Ângulo Zenital Solar (AZS) foi mantido fixo em 30°.....	95
Figura 4.25 – Efeito da direção de espalhamento sobre os espectros de reflectância MODIS reais do dia 6 (espalhamento frontal) e 8 de dezembro (retroespalhamento) de 2005. Comparação entre os dados reais MODIS e simulados pelo PROSAIL para a variedade Perdiz. A simulação pelo PROSAIL utilizou os mesmos parâmetros geométricos associados à aquisição das imagens MODIS. IAF de aproximadamente 0,3. A reamostragem utilizou as funções filtro do MODIS.....	96
Figura 4.26 - Efeito da direção de espalhamento sobre os espectros de reflectância MODIS reais do dia 21 (espalhamento frontal) e 22 (retroespalhamento) de dezembro de 2005. Comparação entre os dados reais MODIS e simulados pelo PROSAIL para a variedade Perdiz. A simulação pelo PROSAIL	

utilizou os mesmos parâmetros geométricos associados à aquisição das imagens MODIS. IAF de aproximadamente 3. A reamostragem utilizou as funções filtro do MODIS.	97
Figura 4.27 - Efeito da direção de espalhamento sobre os espectros de reflectância MODIS reais do dia 5 (retroespalhamento) e 6 (espalhamento frontal) de fevereiro de 2005. Comparação entre os dados reais MODIS e simulados pelo PROSAIL para a variedade Perdiz. A simulação pelo PROSAIL utilizou os mesmos parâmetros geométricos associados à aquisição das imagens MODIS. IAF de aproximadamente 5. A reamostragem utilizou as funções filtro do MODIS.	98
Figura 4.28 – Espectro de reflectância MODIS da variedade de soja Perdiz, cultivada na fazenda Tanguro, no ano-safra 2004-2005. Os dias após o plantio e a direção do espalhamento estão indicados. Os símbolos se referem ao posicionamento do comprimento de onda central das bandas do MODIS.	99
Figura 4.29 - Espectro de reflectância MODIS da variedade de soja Tabarana, cultivada na fazenda Alvorada, no ano-safra 2005-2006. Os dias após o plantio e a direção do espalhamento estão indicados. Os símbolos se referem ao posicionamento do comprimento de onda central das bandas do MODIS.	100
Figura 4.30 - Relação entre os valores de reflectância MODIS da banda do vermelho e do IVP, extraídos de 42 imagens de MODIS 250 m compreendendo todas as fazendas e ângulos de visada do ano-safra de 2005-2006.	101
Figura 4.31 - Média da reflectância MODIS da variedade Perdiz em dois estádios de desenvolvimento do ano-safra 2005-2006. Simbolos fechados representam a direção do retroespalhamento e símbolos abertos representam a direção do espalhamento frontal. Em dezembro a soja estava com 42 dias e em janeiro com 76 dias após o plantio.	102
Figura 4.32 - Média da reflectância MODIS da variedade Monsoy 9010 em dois estádios de desenvolvimento do ano-safra 2005-2006. Simbolos fechados	

representam a direção do retroespalhamento e símbolos abertos representam a direção do espalhamento frontal. Em dezembro a soja estava com 42 dias e em janeiro com 76 dias após o plantio.....	103
Figura 4.33 – Variação da reflectância MODIS da banda do vermelho em função do desenvolvimento da variedade Perdiz e em função da geometria de visada do MODIS.	104
Figura 4.34 - Variação da reflectância MODIS da banda do IVP em função dos desenvolvimento da variedade Perdiz e em função da geometria de visada do MODIS.	104
Figura 4.35 - Variações do NDVI em função de distintas variedades de soja e pares de imagens adquiridas em ângulos de visada do direções opostas, para um dossel incompleto (21 e 22 de dezembro de 2005, representado pelos símbolos abertos) e para um dossel fechado (23 e 24 de janeiro de 2006, símbolos fechados).	105
Figura 4.36 – Variação do NDVI para a variedade Emgopa (fazenda Mutum) para pares de imagens MODIS adquiridas em estádios de desenvolvimento constantes (dias consecutivos) e com ângulos de visada obtidos em direções opostas (retroespalhamento e espalhamento frontal). Os dias após o plantio estão indicados. Os valores dos ângulos de visada são apresentados na Tabela 3.5.	106
Figura 4.37 - Relação de regressão com intercepto fixo em zero para os valores de NDVI derivados de imagens MODIS obtidas nas direções do retroespalhamento e do espalhamento frontal, para três classes de ângulo de visada. Um total de 13 pares de imagens MODIS (250 m) (Tabela 3.5) e todas as variedades foram consideradas nas análises.	108
Figura 4.38 – Variação espacial do NDVI (fazenda Mutum) para um mesmo estádio de desenvolvimento da soja, calculado da direção de (a) retroespalhamento e (b) espalhamento frontal. As diferenças entre ambas as imagens de NDVI são apresentadas na figura (c).....	109
Figura 4.39 - Variação do NDVI em função do desenvolvimento fenológico da variedade Perdiz e do ângulo de visada MODIS.	111

Figura 4.40 - Variação do EVI em função do desenvolvimento fenológico da variedade Perdiz e do ângulo de visada MODIS.	111
Figura 4.41 – Variação do EVI para a variedade Perdiz (fazenda Tanguro) para pares de imagens MODIS adquiridas em estágio de desenvolvimento constantes (dias consecutivos) e com ângulos de visada em direções opostas (retroespalhamento e espalhamento frontal). Os dias após o plantio estão indicados.	112
Figura 4.42 – Relação entre o EVI e a reflectância da banda do IVP utilizada para o cálculo do EVI. A reta de regressão está indicada em azul.	112
Figura 4.43 – Normalização angular (valores médios) dos quatro índices de vegetação estudados, calculados a partir de imagens obtidas em dias consecutivos e em ângulos de visada em direções opostas, para dosséis de soja incompletos (21 e 22 de dezembro de 2005) e completos (23 e 24 de janeiro de 2006).	115
Figura 4.44 – Frequência dos pixels dos índices de vegetação (diferenças angulares) com a menor sensibilidade aos efeitos direcionais para um dossel de soja incompleto (dezembro) e dossel completo (janeiro) no ano-safra 2004-2005.	116
Figura 4.45 – Frequência dos pixels dos índices de vegetação (diferenças angulares) com a menor sensibilidade aos efeitos direcionais para um dossel de soja incompleto (dezembro) e dossel completo (janeiro) no ano-safra 2005-2006.	116
Figura 4.46 – Frequência dos pixels de IAF que tiveram seus valores estimados pelo algoritmo de backup do MODIS, considerando as quatro fazendas em estudo. A frequência foi determinada a partir de 23 imagens para cada ano-safra da composição 8-dias do produto de IAF MOD15A2. Foram utilizadas funções gaussianas ajustadas aos dados para facilitar a interpretação e visualização das tendências.	118
Figura 4.47 – Modelos empíricos “local” e “global” (Knyazikhin et al., 1999; broadleaf crops) entre NDVI e IAF. A faixa tracejada mostra uma região onde pequenas variações do NDVI podem gerar grandes diferenças no IAF	

estimado pelo modelo.	121
Figura 4.48 – Relação entre as estimativas de IAF geradas pelo algoritmo backup do MODIS e os modelos empíricos (a) “local” e (b) “global” (ATBD MOD15; Knyazikhin et al., 1999).	122
Figura 4.49 – Estimativas de IAF para a variedade Emgopa (fazenda Mutum; ano-safra 2004-2005) feitas utilizando o modelo empírico “global” (linhas sólidas) e o modelo empírico “local” (linhas tracejadas), baseados na relação entre NDVI e IAF. Os dias após o plantio são indicados. As estimativas foram plotadas para pares de imagens adquiridas em um mesmo estágio fenológico e com direções de visada opostas (Tabela 3.5).	123
Figura 4.50 - Estimativas de IAF para a variedade Monsoy 8914 (fazenda Mutum; ano-safra 2004-2005) feitas utilizando o modelo empírico “global”. As estimativas foram plotadas para pares de imagens adquiridas em um mesmo estágio fenológico e com direções de visada opostas (Tabela 3.5).	124
Figura 4.51 – Variabilidade espacial do IAF (fazenda Mutum) estimado para um mesmo estágio fenológico através de relações empíricas na direção do (a) retroespalhamento e (b) espalhamento frontal.	126
Figura 4.52 – Diferenças entre as estimativas de IAF feitas em ambas as direções para o modelo empírico (a) “global” e (b) “local”.	127

LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
Tabela 2.1 – Índices de vegetação calculados a partir do Hyperion.....	14
Tabela 2.2 – Especificações técnicas das bandas do visível, infravermelho próximo (IVP) e infravermelho de ondas curtas (SWIR) do MODIS/Terra.....	15
Tabela 2.3 – Parâmetros de entrada do modelo de transferência radiativa PROSAIL.....	39
Tabela 3.1 - Parâmetros agronômicos da soja para o ano-safra 2004-2005.....	48
Tabela 3.2 - Parâmetros agronômicos da soja para o ano-safra 2005-2006.....	48
Tabela 3.3 – Parâmetros biofísicos e bioquímicos constantes utilizados nas simulações com o PROSAIL.	55
Tabela 3.4 – Parâmetros biofísicos e geométricos (iluminação e visada) dinâmicos utilizados como entrada no PROSAIL.	56
Tabela 3.5 – Pares de imagens MODIS adquiridas em datas próximas e com ângulo zenital de visada oposto, para os anos-safra 2004-2005 e 2005-2006....	61
Tabela 3.6 – Classes de ângulo zenital de visada utilizadas para comparar o NDVI calculado para a direção do retroespalhamento e espalhamento frontal. <i>N</i> representa o número de pares de NDVI com direções de visada opostas, obtidos nas 13 datas apresentadas na Tabela 3.5.	62
Tabela 3.7 – Lista de imagens MODIS do ano-safra 2005-2006 utilizadas para avaliar as variações temporais do FRB e dos índices de vegetação.	63
Tabela 3.8 – Índices de vegetação derivados das sete primeiras bandas do MODIS....	64
Tabela 4.1 – Efeitos direcionais sobre o NDVI para a direção do retroespalhamento e espalhamento frontal e em função das classes de ângulo. <i>N</i> representa o número de pares de NDVI com direções de visada opostas, obtidos nas 13 datas apresentada na Tabela 3.5.	108
Tabela 4.2 – Efeitos direcionais do NDVI MODIS calculado com imagens obtidas na direção do espalhamento frontal e retroespalhamento, considerando diferentes estádios de desenvolvimento da soja e classes de ângulo. <i>N</i>	

representa o número de pares de imagens com ângulos de visada opostos.....	110
Tabela 4.3 – Coeficientes do teste não paramétrico Wilcoxon Signed Rank para avaliar as diferenças entre índices de vegetação calculados para um mesmo estágio fenológico e geometria de visada na direção do espalhamento frontal (ângulo de visada de -58° no dia 21 de dezembro de 2005) e retroespalhamento (41° no dia 22 de dezembro de 2005).	114
Tabela 4.4 – Frequência da classificação dos pixels do produto MOD12Q1 localizados nas quatro fazendas estudadas, para os anos-safra 2004-2005 e 2005-2006.	119
Tabela 4.5 – Diferenças de NDVI e IAF calculado pelo modelo empírico “global” para pares de imagens adquiridas em dias próximos (mesmo estágio de desenvolvimento), mas com direções de visada opostas (retroespalhamento e espalhamento frontal).....	125

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

3D = Três dimensões (Three Dimensional)

6S = Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum

AAR = Ângulo Azimutal Relativo

ANA = Agência Nacional de Águas

ANIF = fator de reflectância bidirecional anisotrópico (Anisotropy Factor)

ARS = Agricultural Research Service

ARVI = Atmospherically Resistant Vegetation Index

ATDB = Algorithm Theoretical Basis Document

AVHRR = Advanced Very High Resolution Radiometer

AVIRIS = Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer

AZS = Ângulo Zenital Solar

AZV = Ângulo Zenital de Visada

BRDF = função de distribuição da reflectância bidirecional

Cab = Clorofila *a* e *b*

Car = Conteúdo de carotenóides

Cbrown = Conteúdo de pigmentos marrons

CHRIS = Compact High Resolution Imaging Spectrometer

Cm = Conteúdo de matéria seca

COLA = Center for Ocean=Land=Atmosphere

CONAB = Companhia Nacional de Abastecimento

CRI = Carotenoid Reflectance Index

Cw = Espessura equivalente de água

DAF = função de Distribuição Angular de Folhas

DAP = Dias após o plantio

EMBRAPA = Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

EMMAH = Environnement Méditerranéen et Modélisation des Agro-Hydrosystèmes

EO-1 = Earth Observing One Mission

ESA = European Space Agency

EVI = Enhanced Vegetation Index

FAPAR = Fração Absorvida da Radiação Fotossinteticamente Ativa

FLAASH = Fast Line-of-Sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes

FRB = Fator de Reflectância Bidirecional

GESAVI = Generalized Soil Adjusted Vegetation Index

GNDVI = Greenness Normalized Difference Vegetation Index

GrADS = Grid Analysis and Display System

HDF = Hierarchical Data Format

HgCdTe = Mercúrio-Cádmio-Telúrio = Teloreto de Cádmio e Mercúrio

HJ-1A = Satélite Huan Jin 1A

hspot = Parâmetro hot spot

IAF = Índice de Área Foliar

IDL = Interactive Data Language

IFOV = Campo de Visada Instantâneo

ihot = Parâmetro de transmissão do hot spot

INMET = Instituto Nacional de Meteorologia

INRA = Institut National de la Recherche Agronomique

IV = Índice de vegetação

IVP = Infravermelho Próximo

LSRSCF = Land Surface Reflectance Science Computing Facility

LUT = Look-Up Tables

MISR = Multi=angle Imaging SpectroRadiometer

MNF = Minimum Noise Fraction

MODIS = Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer

MRT = MODIS Reprojection Tools

MSI = Moisture Stress Index

MSS = Multispectral Scanner

N = Parâmetro estrutural da folha

NASA = National Aeronautics and Space Administration

NDII = Normalized Difference Infrared Index

NDVI = Normalized Difference Vegetation Index

NDWI = Normalized Difference Water Index

nm = Nanômetros

NPV = Vegetação Não Fotossinteticamente Ativa (non-photosynthetic vegetation)

PEP = Red Edge Position

PRI = Photochemical Reflectance Index

PROBA = Project for On-Board Autonomy

PROSAIL = Combinação do PROSPECT e SAIL

PROSPECT = Modelo de transferência radiativa dentro de folhas

psoil = Coeficiente do solo

PSRI = Plant Senescence Reflectance Index

R = Estádio reprodutivo da soja

REM = Radiação Eletromagnética

RENDVI = Red Edge Normalized Difference Vegetation Index

RMSE = Root Mean Squared Error

RT = Transferência Radiativa

SAIL = Scattering by Arbitrarily Inclined Leaves

SAM = Mapeador do Ângulo Espectral – Spectral Angle Mapper

SAVI = Soil Adjusted Vegetation Index

SFF = spectral feature fitting

SIPI = Structure Insensitive Pigment Index

skyl = Razão radiação difusa/direta

SNR = Relação Sinal-Ruído (Signal to Noise Ratio)

SPOT = Satellite Pour l'Observation de la Terre

SR = Simple Ratio

SWIR = Infravermelho de Ondas Curtas

TIR = Infravermelho Termal

TM = Thematic Mapper

TRMM = Tropical Rainfall Measuring Mission

USGS = United States Geological Survey

VARI = Visible Atmospherically Resistant Index

Vig = Visible Green Index

VN = Valor Normalizado

VNIR = Visível e Infravermelho Próximo

VOG1 = Vogelmann Red Edge Index 1

WBI = Water Band Index

WIST = Warehouse Inventory Search Tool

WSRT = Wilcoxon Signed Rank Test

LISTA DE SÍMBOLOS

ρ = Reflectância

λ = Comprimento de onda

θ_i = Ângulo Zenital Iluminação = AZS (Ângulo Zenital Solar)

ϕ_i = Ângulo Azimutal de Iluminação

θ_o = Ângulo Zenital de Visada = AZV (Ângulo Zenital de Visada)

ϕ_o = Ângulo Azimutal de Visada

β = Inclinação da Reta

r = Coeficiente de correlação

SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Objetivo geral.....	5
1.2 Objetivos específicos.....	5
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	7
2.1 A cultura da soja	7
2.2 Sensoriamento remoto agrícola e parâmetros biofísicos	10
2.2.1 Sensoriamento remoto multiespectral no monitoramento da atividade agrícola	11
2.2.2 Espectroscopia de imageamento na agricultura: abordagem hiperespectral	12
2.2.3 Índices de vegetação	13
2.3 Sistemas sensores	15
2.3.1 MODerate-resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS).....	15
2.3.2 Hyperion/EO-1	16
2.4 Efeitos bidirecionais.....	17
2.4.1 Propriedades das folhas e características dos dosséis agrícolas	19
2.4.2 Geometria de iluminação e de visada	21
2.4.3 Relações da geometria de iluminação e visada com a atmosfera	23
2.4.4 Contribuição do substrato	24
2.4.5 Variações na escala de observação associadas à geometria de observação	25
2.4.6 Impacto dos efeitos direcionais no comportamento espectral de dosséis agrícolas na faixa espectral de 400-2500 nm.....	26
2.4.7 Variação dos efeitos direcionais ao longo do ciclo fenológico das culturas agrícolas	28
2.4.8 Abordagem geral da radiação de cena em cultivos agrícolas	29
2.4.9 Efeito da geometria de iluminação e de visada nos índices de vegetação e nas estimativas de parâmetros biofísicos	31
2.4.10 Efeitos da geometria de iluminação e de visada sobre a reflectância da soja	33
2.5 Modelos de simulação de reflectância de dosséis agrícolas e estimativa de parâmetros biofísicos ...	35
2.6 PROSAIL	37
2.7 Métodos estatísticos	43

2.7.1 Wilcoxon Signed Rank Test (WSRT).....	43
2.7.2 Técnica de reamostragem Bootstrap.....	44
3 METODOLOGIA.....	45
3.1 Área de estudo – visão geral	46
3.2 Aquisição dos dados agronômicos e das imagens de satélite	47
3.2.1 Aquisição dos dados agronômicos	47
3.2.2 Imagens de satélite	49
3.2.2.1 Produtos MODIS	49
3.2.2.2 Imagens Hiperespectrais Hyperion/EO-1	51
3.2.3 Dados de Precipitação	52
3.3 Avaliação da influência da geometria de iluminação e de visada sobre a reflectância e os índices de vegetação com simulações no PROSAIL.....	52
3.3.1 Ajuste dos parâmetros bioquímicos e biofísicos fixos (constantes) no processo de modelagem.	53
3.3.2 Ajuste dos parâmetros biofísicos e geométricos dinâmicos	56
3.3.3 Comparação da reflectância simulada com a reflectância Hyperion	56
3.3.4 Avaliação dos espectros de reflectância em função do AZV	57
3.3.5 Avaliação dos espectros de reflectância em função do AZS	58
3.3.6 Avaliação dos índices de vegetação em função do AZV e AZS	58
3.3.7 Comparação da reflectância simulada com a reflectância observada pelo MODIS para variedades de soja.....	58
3.4 Efeitos da geometria de visada sobre a reflectância e índices de vegetação (NDVI e EVI) com dados MODIS.....	59
3.4.1 Impacto do AZV do MODIS sobre a reflectância de variedades de soja	59
3.4.2 Impacto do AZV sobre os índices de vegetação de variedades de soja	61
3.4.3 Avaliação temporal dos efeitos do AZV sobre a reflectância e índices de vegetação da soja	62
3.4.4 Análise da sensibilidade dos índices de vegetação ao AZV	63
3.4.5 Avaliação das faixas de maior influência do AZV MODIS	64
3.4.6 Determinação do índice de vegetação menos sensível ao AZV	64
3.5 Efeito da geometria de visada e iluminação sobre as estimativas de IAF	65
3.5.1 Avaliação da qualidade do produto IAF MODIS	65
3.5.2 Avaliação do modelo empírico global MODIS	67

3.5.3	Elaboração de um modelo empírico local	67
3.5.4	Estimativa do IAF em função dos efeitos direcionais	68
3.5.5	Espacialização dos dados estimados	68
3.5.6	Avaliação temporal das estimativas de IAF	68
3.5.7	Comparação entre os modelos empíricos	69
3.6	Integração dos resultados do efeito da geometria de visada e iluminação sobre a reflectância	69
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	71
4.1	Estudo da influência da geometria de iluminação e de visada na reflectância e nos índices de vegetação com simulações no PROSAIL	71
4.1.1	Ajuste dos parâmetros biofísicos e geométricos no modelo PROSAIL	71
4.1.2	Efeito do IAF e da DAF na reflectância simulada	74
4.1.3	Avaliação do ângulo azimutal relativo (AAR) sobre os espectros de reflectância simulados pelo PROSAIL	75
4.1.4	Avaliação do efeito do ângulo zenital de visada (AZV) sobre os espectros de reflectância simulados pelo PROSAIL	80
4.1.5	Avaliação do efeito do ângulo zenital solar (AZS) sobre os espectros de reflectância simulados pelo PROSAIL	85
4.1.6	Efeito dos ângulos zenitais de visada e solar sobre os índices de vegetação	88
4.1.6.1	NDVI (Normalized Difference Vegetation Index)	89
4.1.6.2	EVI (Enhanced Vegetation Index)	91
4.1.6.3	NDWI (Normalized Difference Water Index)	93
4.1.6.4	Outros índices de vegetação	94
4.1.7	Comparação entre os espectros simulados e espectros medidos pelo MODIS	95
4.2	Avaliação dos efeitos direcionais sobre a reflectância e índices de vegetação com dados do sensor MODIS	98
4.2.1	Impacto dos efeitos direcionais sobre a reflectância diária do sensor MODIS/Terra	98
4.2.2	Efeitos direcionais sobre os índices de vegetação diários do MODIS	106
4.2.3	Análise de sensibilidade dos índices de vegetação aos efeitos da geometria de visada do sensor MODIS	113
4.3	Avaliação dos efeitos direcionais sobre as estimativas de IAF a partir de modelos empíricos	117
4.3.1	Avaliação do produto IAF MODIS (MOD15A2)	117
4.3.2	Modelos empíricos de estimativa de IAF	120

4.3.3 Espacialização do impacto dos efeitos direcionais sobre as estimativas de IAF através do modelo empírico “global” e “local”.....	126
4.4 Discussão integrada dos resultados.....	127
5 CONCLUSÕES.....	131
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	135
APÊNDICE A - Artigo publicado na revista “International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation”.	167
APÊNDICE B - Artigo submetido e em avaliação na revista “Anais da Academia Brasileira de Ciências”. Em avaliação em 25/01/2011.	177
ANEXO A – Artigo publicado como coautor na revista “Remote Sensing of Environment”.....	197
ÍNDICE REMISSIVO	209

1 INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, o Brasil tem experimentado uma rápida expansão na produção de soja. Esse é um significativo resultado das pesquisas desenvolvidas pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA) em colaboração com outras instituições. Atualmente, a soja é uma das principais *commodities* brasileiras e é responsável por parte do superávit da balança comercial agropecuária brasileira. Além disso, em toda a cadeia de produção até o consumidor final, um grande número de empregos diretos e indiretos é gerado.

Estudos que avaliam e viabilizam o monitoramento e as estimativas de parâmetros biofísicos da soja são fundamentais para antecipar valores de produtividade e reduzir os impactos ambientais através da agricultura de precisão. Modelos de estimativa de produtividade podem fazer uso de parâmetros biofísicos estimados através de dados de sensoriamento remoto. Pesquisas desenvolvidas por Rizzi e Rudorff (2007) utilizaram como entrada (*input*) o produto Índice de Área Foliar (IAF) do sensor *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS) para estimar a produtividade da soja. Entretanto, o período de máximo desenvolvimento da soja nas regiões Centro Oeste e Norte do Brasil coincide com o período de máxima cobertura de nuvens. Esse fato acarreta uma alta frequência de pixels de IAF do produto MODIS estimados via modelos empírico e não através do modelo de transferência radiativa (RIZZI et al., 2006). Isto pode comprometer a qualidade das estimativas de IAF geradas e potencialmente afetar os resultados dos modelos que utilizam este dado como parâmetro de entrada.

Os índices de vegetação são amplamente utilizados para caracterizar a dinâmica da vegetação e para estimar parâmetros biofísicos como o IAF (KNYAZIKHIN et al., 1998; MYNENI et al., 2002; JACKSON et al., 2004; RIZZI et al., 2006; YI et al., 2008; JIANG et al., 2010). Na teoria, o índice de vegetação ideal deveria maximizar a resposta do vigor da vegetação e minimizar a influência dos fatores não desejados (p.ex. efeitos direcionais, atmosfera, substrato). Na prática, não existe um índice de vegetação ideal e, assim, um grande número de índices com diferentes aprimoramentos foi proposto na

literatura após a publicação do *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI) por Rouse et al. (1973). A formulação do *Enhanced Vegetation Index* (EVI) ressalta a sensibilidade à alta biomassa e em tese reduz o efeito da atmosfera e do substrato (HUETE et al., 2002; JIANG et al., 2008). O *Normalized Difference Water Index* (NDWI) é indicado para detectar a vegetação verde através de medidas indiretas do conteúdo de água das folhas ou dossel (GAO, 1996; JACKSON et al., 2004). Mesmo assim, a maioria dos índices de vegetação é sensível aos efeitos direcionais (WARDLEY, 1984; MYNENI; WILLIAMS, 1994; EPIPHANIO; HUETE, 1995; WALTER-SHEA et al., 1997; APARICIO et al., 2004; CHEN et al., 2005; GALVÃO et al., 2009; BREUNIG et al., 2011).

No sistema fonte-sensor-alvo, para uma cena agrícola, os efeitos direcionais dependem basicamente do comprimento de onda, da arquitetura do dossel, do estágio fenológico e do nível de aquisição dos dados (MIURA et al., 2000; GAO et al., 2003; DORAISWAMY et al., 2005; JIANG et al., 2010). Especialmente quando sensores de amplo campo de visada como o MODIS são utilizados, os efeitos direcionais devem ser considerados (MEYER et al., 1995). Apesar do ganho em repetitividade (resolução temporal) proporcionado por estes tipos de sensores, o amplo campo de visada implica que um mesmo alvo seja imageado com diferentes configurações de iluminação e visada para aquisições consecutivas (dias próximos).

O sensor MODIS, a bordo da plataforma Terra (XIONG et al., 2005), permite o imageamento aproximadamente diário e a geração de produtos como índices de vegetação e estimativas de IAF (SHABANOV et al., 2005). Sua importância refere-se à possibilidade de efetuar estudos em escala global, regional e até mesmo local. Como as bandas espectrais do MODIS abrangem as faixas espectrais do visível, infravermelho próximo (IVP), infravermelho de ondas curtas (SWIR) e do infravermelho termal (TIR), é possível calcular vários índices de vegetação como, por exemplo, o NDVI, EVI e o NDWI. Por outro lado, com um recobrimento quase diário, os estudos para um determinado estágio fenológico de culturas agrícolas, como a soja, com base em imagens MODIS, são susceptíveis a grandes variações na geometria de iluminação e de visada (ângulo zenital de visada – AZV; ângulo zenital solar – AZS e ângulo azimutal

relativo – AAR). Esses efeitos manifestam-se através de grandes variações nos valores da reflectância de superfície e consequentemente influenciam nos valores dos índices de vegetação e nas estimativas de IAF derivadas de modelos empíricos.

O NDVI do MODIS é amplamente utilizado para caracterizar e monitorar as condições e o crescimento de culturas agrícolas (KARLSEN et al., 2008; ALEXANDRIDIS et al., 2008; REN et al., 2008). As estimativas de IAF a partir do NDVI representam outra importante aplicação do índice, apesar de serem afetadas por vários fatores. Além dos erros associados a classificações errôneas do bioma, uma das principais limitações refere-se ao fato de o NDVI saturar para condições de IAF relativamente baixo (MYNENI et al., 2002). A estes erros soma-se o fato de o NDVI (e os outros índices de vegetação) ser dependente da direção de visada e de iluminação (MEYER et al., 1995; HU et al., 2000; LIESENBERG et al., 2007). As variações do NDVI em função da geometria de visada foram avaliadas por Epiphanyo e Huete (1995) e por Walter-Shea et al. (1997) em experimentos de campo e por Breunig et al. (2011) com dados orbitais do sensor MODIS. Os resultados mostraram que o NDVI calculado para a direção do retroespalhamento tende a ser inferior ao derivado das imagens adquiridas na direção do espalhamento frontal, para um mesmo estágio fenológico da cultura agrícola.

O IAF é definido como a área total de um lado das folhas de um dossel, por unidade de área de solo. Este é um importante parâmetro para monitorar o crescimento das culturas agrícolas e aperfeiçoar o desempenho dos modelos de estimativas agrícolas (DORAISWAMY et al., 2005; MO et al., 2005; FANG et al., 2008). Devido às dificuldades de fazer medições diretas de IAF (custo financeiro, tempo, limitações práticas dos métodos destrutivos), o uso de técnicas do sensoriamento remoto é uma alternativa para fazer estimativas de IAF para grandes áreas em um espaço curto de tempo (YI et al., 2008).

A geração das composições 8-dias do produto IAF do MODIS (MOD15A2), com resolução espacial de 1 km, faz uso de duas metodologias. No produto IAF MODIS da coleção 5, a primeira abordagem, denominada de “Algoritmo Principal”, utiliza um conjunto de dados tabelados (*look-up tables* – LUT) e um mapa de cobertura para 8

biomas (que incluem atributos do substrato), para inverter o modelo de transferência radiativa 3D e gerar as estimativas de IAF (KNYAZIKHIN et al., 1998; MYNENI et al., 2002; PRIVETTE et al., 2002). O algoritmo principal gera estimativas de IAF utilizando como entrada dados da direção de iluminação e visada, reflectância bidirecional de diferentes bandas espectrais e o mapa de bioma (cobertura) (TAN et al., 2005). A segunda metodologia, denominada de “Algoritmo de Backup”, é utilizada quando o algoritmo principal falha devido a deficiências na formulação do modelo e a incertezas dos dados de entrada (YANG et al., 2006). O algoritmo de backup é baseado em relações empíricas entre o NDVI e o IAF para cada um dos biomas (KNYAZIKHIN et al., 1999; MYNENI et al., 1997).

Com o objetivo de entender como os efeitos direcionais afetam a reflectância da vegetação e os produtos resultantes como os índices de vegetação e o IAF, os modelos de transferência radiativa têm sido amplamente utilizados. Ao acoplar o modelo de transferência radiativa PROSPECT que simula a interação da radiação dentro de folhas (JACQUEMOUD; BARET, 1990) e o *Scattering by Arbitrarily Inclined Leaves* (SAIL) dedicado à simulação da propagação da radiação em dosséis (VERHOEF, 1984; VERHOEF et al., 2007) foi criado o PROSAIL, que permite modelar conjuntamente tanto os parâmetros das folhas quanto os do dossel (JACQUEMOUD et al., 2009). Este modelo permite simular a reflectância (hemisférica e bidirecional) para o intervalo espectral entre 400 e 2500 nm (intervalos de 1 nm) com distintas configurações geométricas (AZV, AZS e AAR) e para diferentes concentrações de parâmetros biofísicos (clorofila, conteúdo de água, carotenoides, estrutura da folha, etc).

No contexto dos efeitos direcionais sobre a reflectância, índices de vegetação e IAF, a presente pesquisa baseia-se na hipótese de que, os efeitos de geometria de aquisição de dados afetam de forma diferenciada a determinação de índices de vegetação em função da sua formulação (grau de dependência das bandas). Consequentemente, a geração de produtos derivados desses índices (p.ex. IAF) também é afetada.

Assim, através da compreensão aprofundada dos efeitos direcionais sobre a reflectância de dosséis de soja, será possível identificar os índices de vegetação que propiciam uma

representação mais fidedigna das variações biofísicas da vegetação e uma avaliação do real impacto do AZV e do AZS sobre as estimativas de IAF baseadas em modelos empíricos.

1.1 Objetivo geral

Desta forma, esta pesquisa teve como objetivo geral avaliar as implicações dos efeitos direcionais, com diferentes geometrias de iluminação e visada, sobre a reflectância de dosséis de soja em distintos estádios de desenvolvimento com dados do sensor multiespectral MODIS, hiperespectral Hyperion e simulados da reflectância com o modelo PROSAIL.

1.2 Objetivos específicos

Entre os objetivos específicos são destacados os seguintes:

- avaliar os efeitos da geometria de iluminação e visada sobre o fator de reflectância bidirecional e sobre índices de vegetação da soja através do modelo de transferência radiativa PROSAIL;
- estudar as diferenças na dinâmica espectral-angular das principais variedades de soja em função dos estádios fenológicos, usando dados MODIS;
- estimar os impactos da geometria de visada do sensor MODIS sobre os índices de vegetação NDVI e EVI e sobre as estimativas empíricas de IAF;
- identificar os índices de vegetação menos afetados pelos efeitos direcionais e geometria de iluminação e visada; e
- avaliar o modelo empírico global do produto IAF MODIS e elaborar um modelo empírico local, ajustado ao dossel de soja referente à área de estudo.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 A cultura da soja

Originária do leste da Ásia, a cultura da soja (oleaginosa *Glicine max (L.) Merrill*) foi introduzida no Brasil em 1882 no Estado da Bahia (EMBRAPA-SOJA, 2009). Na sequência, foi levada para o Estado de São Paulo e depois para o Rio Grande do Sul. Inicialmente, era utilizada como forrageira e a partir da década de 1960 passou a ser produzida com finalidades comerciais (especialmente devido à demanda internacional). Atualmente, o Estado do Mato Grosso (MT) é o maior produtor de soja do Brasil (Figura 2.1 a). A Figura 2.1 b mostra que a soja foi a cultura agrícola que teve o maior crescimento desde 1970. Em termos econômicos, a soja representa uma grande fonte de divisas e empregos para o Brasil. Com a perspectiva de aumento da demanda por biocombustíveis, a soja pode assumir uma importância cada vez maior na balança comercial brasileira (ROESSING e LAZZAROTTO, 2004; DALL'AGNOL e HIRAKURI, 2008; EMBRAPA-SOJA, 2009).

Com uma estimativa de mais de 24 milhões de hectares cultivados com soja na safra 2010/2011 e uma produtividade média estimada em 2,847 toneladas por hectare, o Brasil é o segundo maior produtor mundial dessa cultura, atrás somente dos Estados Unidos. Junto com o aumento da área plantada, a produtividade aumentou significativamente nas últimas décadas, o que levou a uma estimativa de produção de soja no Brasil para 68 milhões de toneladas para a safra 2010/2011. Os estados que apresentam a maior produção são: Mato Grosso, Paraná e o Rio Grande do Sul, com uma produção estimada em aproximadamente 19,5; 13,9 e 8,5 milhões de toneladas no ano safra 2010/2011, respectivamente (CONAB, 2010).

O crescente aumento da produção nacional está associado, principalmente, ao aumento da demanda nacional e internacional pelo produto, ao melhoramento genético das cultivares, ao estabelecimento de um parque industrial de processamento da soja, aos incentivos do governo (principalmente nas décadas de 60 e 70), à substituição da gordura animal pela vegetal, às características topográficas e climáticas favoráveis ao cultivo da soja, à mecanização da produção e ao baixo valor das terras na região Centro-

Oeste (DALL'AGNOL e HIRAKURI, 2008). Lima e May (2009) apresentam duas justificativas para o rápido crescimento da sojicultura no Brasil: 1) novo cenário macroeconômico, refletindo uma maior demanda, e 2) contribuição da pesquisa e desenvolvimento ao aumento da produção e da produtividade.

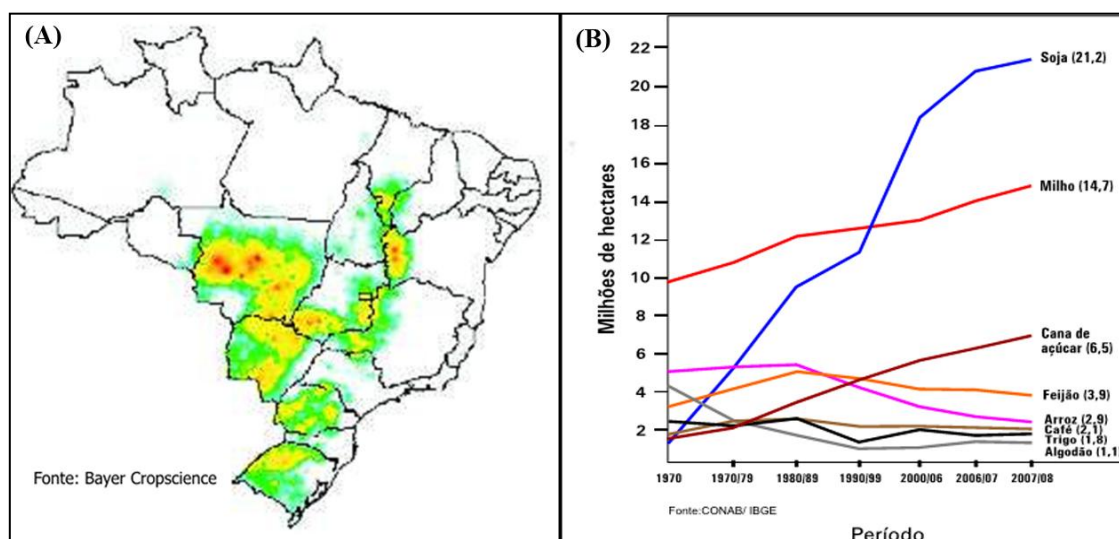


Figura 2.1 – Soja no Brasil. (a) Densidade da produção de soja no Brasil; (b) Evolução da área cultivada das principais culturas agrícolas nacionais.

Fonte: Adaptado de Bayer Cropscience e CONAB/IBGE *apud* DALL'AGNOL e HIRAKURI (2008).

Os primeiros registros da soja retratam uma espécie rasteira cujo grão era considerado sagrado (EMBRAPA-SOJA, 2009). Desde sua introdução no país, diversas variedades de soja foram criadas e/ou modificadas de forma a melhorar a adaptação da cultura às diversas regiões do Brasil. Esse melhoramento genético possibilitou a expansão das áreas cultivadas, com melhor resistência às pragas e doenças, gerando, conseqüentemente, um aumento da produtividade. Um detalhamento sobre a criação e adaptação de germoplasmas e cultivares de soja pode ser encontrado em Pípolo et al. (2007) e em resultados de pesquisas conduzidas pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – Soja (EMBRAPA-SOJA). Entre os fatores que determinam a produtividade da oleaginosa destacam-se as condições climáticas (precipitação, temperatura e fotoperíodo), as características do solo (temperatura, umidade e fertilidade), a adaptação da variedade, a época de plantio e o sistema de cultivo (FARIAS et al., 2007; GARCIA et al., 2007).

O ciclo fenológico da soja depende da variedade e pode variar entre 75 e 200 dias. No Mato Grosso, as variedades são divididas em três grupos de maturação (Embrapa-Soja, 2000, 2008): precoce/semiprecoce (ciclo com menos 125 dias), médio (entre 126-140 dias), semitardio/tardio (mais de 140 dias). Variedades como Perdiz, Emgopa 313, Monsoy 9010, Kaíabi, Uirapuru, DM 309 e Arara-Azul pertencem ao grupo de maturação semitardio/tardio. Tabarana e Monsoy 8411 são exemplos de variedades do grupo de maturação médio, enquanto Monsoy 8110 e DM 118 pertencem ao grupo precoce/semiprecoce (EMBRAPA-SOJA, 2000, 2008).

As características ecofisiológicas da soja foram discutidas por Farias et al. (2007) e Embrapa-Soja (2008) em termos dos estádios vegetativos e reprodutivos. Segundo os autores, a classificação mais aceita foi proposta por Fehr e Caviness (1977) e consiste em uma unificação da terminologia baseada em características da planta. Os estádios vegetativos (VE) são divididos em: VE (emergência da planta); VC (cotilédone); V1 (formação do primeiro nó); V2 (formação do segundo nó); V3, V4... Os estádios reprodutivos são divididos em R1 (início do florescimento), R2 (florescimento pleno), R3 (início da formação da vagem), R4 (vagem completamente desenvolvida), R5 (início do enchimento do grão), R6 (grão completo), R7 (início da maturação) e R8 (maturação plena) (FEHR; CAVINESS, 1977). Existe uma relação entre os estádios fenológicos e os dias após o plantio, que é dependente da variedade ou grupo de maturação.

Regiões com temperatura entre 20°C e 30°C permitem uma melhor adaptação das variedades de soja. A semeadura deve ocorrer preferencialmente com temperatura em torno de 25°C (ideal). Em relação ao fotoperíodo, as variedades apresentam exigências distintas, sendo que, de modo geral, a soja é considerada uma planta de “dia curto”. Em relação à demanda hídrica, o período em que o estresse hídrico mais compromete o rendimento é durante os estádios reprodutivos do R1 ao R6. Especificamente, no período de germinação/emergência, o excesso de água é mais prejudicial, enquanto que durante a floração e o enchimento dos grãos verifica-se a maior demanda por água (geralmente coincide com o período de maior altura e IAF da planta). A partir desse período ocorre uma diminuição da demanda por água (FARIAS et al., 2007; GARCIA et al., 2007; EMBRAPA-SOJA, 2008).

Segundo Garcia et al. (2007), na região Centro-Oeste, a soja plantada durante o mês de novembro tende a apresentar maior produtividade e altura das plantas (possivelmente um maior IAF). Por outro lado, semeaduras tardias (após 20 de dezembro) são mais suscetíveis à ferrugem. Segundo os autores, para reduzir flutuações de produtividade interanual associadas a variações climáticas, é comum plantar duas ou mais cultivares de ciclos de maturação diferentes.

O sistema de produção integrada de soja é discutido por Lima et al. (2008) com enfoque na sustentabilidade, qualidade do produto e viabilidade socioeconômica, com base num projeto de regulamentação da produção integrada da sojicultura brasileira. Aspectos relacionados à fertilidade e nutrição do solo para a cultura da soja são apresentados em Oliveira et al. (2007; 2008), Sfredo (2008), Franchini et al. (2007), Gonçalves et al. (2007), entre outros. Informações sobre controle de pragas, ferrugem e doenças da soja são disponibilizadas em circulares técnicas da Embrapa-Soja.

2.2 Sensoriamento remoto agrícola e parâmetros biofísicos

O sensoriamento remoto assume importância cada vez maior no contexto dos estudos e aplicações agrícolas e agricultura de precisão. O baixo custo para obter informações espacialmente contínuas e em escala sinótica permite que estimativas de parâmetros biofísicos da vegetação sejam feitas com base em modelos físicos. Num mercado cada vez mais competitivo, obter informações agrícolas antecipadamente é importante para regular estoques (segurança alimentar), definir preços de produtos e planejar futuros cultivos. A redução dos custos de produção requer planejamento e informações precisas para definir estratégias de ação. Nesse campo, o sensoriamento remoto apresenta-se como uma ferramenta importante para identificar e monitorar culturas e para fazer estimativas de parâmetros biofísicos e de safras.

Entre os parâmetros biofísicos mais utilizados e estimados no sensoriamento remoto agrícola estão o IAF e a distribuição angular de folhas (DAF). O IAF é um valor adimensional dado pela razão entre o somatório da área de um lado de cada uma das folhas de uma planta pela área da superfície projetada que elas ocupam (GOWER et al., 1999). É um dos principais parâmetros agronômicos e sua estimativa muitas vezes é

complexa. As estimativas de IAF através de imagens podem ser feitas em larga escala a um baixo custo e alta frequência temporal. Contudo, estas estimativas podem carregar um elevado grau de incerteza (inclusive dos métodos de validação, conforme discutido adiante). Os efeitos bidirecionais podem acarretar a super/subestimativa de parâmetros biofísicos.

A DAF é dada pelo ângulo de inclinação (em relação à horizontal à superfície) e azimutal médio das folhas. Devido ao heliotropismo, as plantas podem modificar a distribuição angular ao longo do dia. Rosa e Forseth (1995) destacam que a soja apresenta movimentos das folhas em relação ao fluxo de fótons incidente: os movimentos associados à interceptação da radiação eletromagnética (REM) e ao estresse da folha. No início da manhã e no fim da tarde, as folhas tendem a assumir uma inclinação que favoreça a interceptação de REM. Em horários próximos ao meio dia, as folhas passam a assumir uma distribuição angular que reduz sua exposição ao Sol para reduzir a perda de água e o estresse hídrico e para evitar o aumento da temperatura interna da folha. Em relação ao ângulo azimutal, as folhas normalmente são consideradas como simetricamente distribuídas em todas as direções. Entretanto, devido ao heliotropismo, essa distribuição azimutal pode ser alterada e interferir no Fator de Reflectância Bidirecional (FRB) (GOWER et al., 1999).

2.2.1 Sensoriamento remoto multiespectral no monitoramento da atividade agrícola

Desde o lançamento dos primeiros sensores de imageamento orbital (MSS, Thematic Mapper - TM), a vegetação e, em especial, os cultivos agrícolas receberam atenção. Contudo, com o lançamento de sensores multiespectrais de amplo campo de visada, capazes de imagear o globo em poucos dias (MODIS, Advanced Very High Resolution Radiometer - AVHRR, Satellite Pour l'Observation de la Terre – SPOT/Vegetation), os efeitos da geometria de iluminação e de visada, que estão presentes em uma mesma cena, passaram a ser mais estudados. Isso exige que novas pesquisas sejam realizadas no sentido de elaborar estratégias para eliminar ou amenizar esses efeitos (JU et al., 2010). Os benefícios desses sensores foram mostrados por muitos autores que

estudaram culturas agrícolas com distintas abordagens, cujos resultados são amplamente difundidos na literatura (PONZONI, 2001; PONZONI; SHIMABUKURO, 2007).

2.2.2 Espectroscopia de imageamento na agricultura: abordagem hiperespectral

Estudos hiperespectrais inicialmente realizados em nível de campo e aéreo puderam ser estendidos para o nível orbital com o lançamento do sensor Hyperion/EO-1, do sensor hiperespectral a bordo do satélite chinês Huan Jin – 1A (HJ-1A¹) (YI et al., 2010) e do europeu *Compact High Resolution Imaging Spectrometer* (CHRIS) a bordo do satélite *Project for On-Board Autonomy* (PROBA) (European Space Agency, ESA, 2009). Esses sensores permitem registrar imagens em centenas de bandas de forma contígua, estudar feições espectrais específicas e aumentar a precisão das classificações de alvos agrícolas. As análises passam a ser feitas com base no cubo hiperespectral (MEER; DE JONG, 2001).

No contexto do sensoriamento remoto agrícola, com a disponibilidade de bandas estreitas, novos índices de vegetação foram propostos (CURRAN et al., 1995; GITELSON et al., 1996; GAMON et al., 1997; PENUELAS et al., 1997; HABOUDANE et al., 2002; HABOUDANE et al., 2004). Com o detalhamento espectral (bandas estreitas) das imagens hiperespectrais, as características (posição e ponto de inflexão) da borda vermelha (*red edge*), a feição localizada na transição do vermelho para o infravermelho próximo (690-750 nm), puderam ser exploradas (JAGO et al., 1999; SMITH et al., 2004). Alguns trabalhos foram conduzidos no sentido de detectar pigmentos e estresses (BLACKBURN, 2006; BARET et al., 2007a), validar e calibrar sensores multiespectrais, etc. Para explorar todas as vantagens que as imagens hiperespectrais propiciaram, métodos existentes foram adaptados e novas técnicas de análise foram propostas (p. ex., remoção do contínuo, mapeador do ângulo espectral (SAM), *spectral feature fitting* (SFF) (ITT, 2008). Detalhes sobre a espectroscopia de imageamento podem ser encontrados em Meer e Jong (2001).

¹ Sensor com 128 bandas no intervalo espectral de 450 a 950 nm (12 bits), com 100 m de resolução espacial e largura de imageamento de 50 km e capacidade de apontamento lateral de $\pm 30^\circ$ (Wang et al., 2005; Xianbin et al., 2008; Zhongxin, 2009; Jiang, 2009).

2.2.3 Índices de vegetação

Os índices de vegetação têm por objetivo aumentar a quantidade de informação relacionada à vegetação verde e ao mesmo tempo minimizar os efeitos do substrato, da geometria de aquisição dos dados e da atmosfera, com base na utilização de várias bandas combinadas (MEER; DE JONG, 2001). Devido às características de reflectância/absorção, os índices de vegetação tendem a combinar bandas de distintas regiões do espectro. Assim, os índices de vegetação podem ser divididos em grandes grupos relacionados: a) aos pigmentos, b) ao conteúdo de água do dossel, c) à eficiência do uso da luz, d) à borda vermelha.

Dezenas de índices de vegetação de bandas estreitas podem ser calculados com dados hiperespectrais (Tabela 2.1), avaliados em função de sua sensibilidade aos efeitos direcionais (Apêndice C, pág. 177) e correlação com a produtividade (Anexo A, pág. 197). Entretanto, nem todos podem ser analisados usando as bandas do MODIS.

Na Tabela 2.1 são apresentados diversos índices de vegetação e suas respectivas equações e referências: 1) *Atmospherically Resistant Vegetation Index* (ARVI), 2) *Enhanced Vegetation Index* (EVI), 3) *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI), 4) *Simple Ratio* (SR), 5) *Moisture Stress Index* (MSI), 6) *Normalized Difference Infrared Index* (NDII), 7) *Normalized Difference Water Index* (NDWI), 8) *Water Band Index* (WBI), 9) *Plant Senescence Reflectance Index* (PSRI), 10) *Carotenoid Reflectance Index* (CRI), 11) *Photochemical Reflectance Index* (PRI), 12) *Structure Insensitive Pigment Index* (SIPI), 13) *Red Edge Normalized Difference Vegetation Index* (RENDVI), 14) *Red Edge Position* (REP), 15) *Vogelmann Red Edge Index 1* (VOG1), 16) *Visible Atmospherically Resistant Index* (VARI), e 17) *Visible Green Index* (VIG).

De forma simplificada, os índices ARVI, EVI, NDVI, SR, CRI, VARI e VIG são índices mais relacionados com pigmentos de folhas (p.ex., clorofila e carotenóides). Os índices MSI, NDII, NDWI e WBI estão mais associados com o conteúdo de água das folhas. O PSRI pode indicar estresse, enquanto o PRI e o SIPI podem expressar a eficiência do

uso da luz. Os índices RENDVI, REP e VOG1 são índices propostos para caracterizar a feição da borda vermelha (“red edge”) nos espectros de vegetação (GALVÃO et al., 2009).

Os índices de vegetação de bandas largas são calculados a partir de imagens multiespectrais de sensores como o MODIS. Índices como o EVI, NDVI e NDWI podem ser calculados tanto com bandas estreitas (p.ex., do Hyperion ou de simulações no PROSAIL), quanto com bandas largas (p.ex., do MODIS). De fato, o EVI e o NDVI são produtos gerados pelo MODIS e disponibilizados para a comunidade de usuários.

Tabela 2.1 – Índices de vegetação calculados a partir do Hyperion.

Índice de vegetação	Fórmula ¹	Referência
ARVI	$\frac{(\rho_{864} - (2 * \rho_{671} - \rho_{467}))}{(\rho_{864} + (2 * \rho_{671} - \rho_{467}))}$	KAUFMAN; TANRÉ (1992)
EVI	$2,5 * \left(\frac{(\rho_{864} - \rho_{671})}{(\rho_{864} + 6 * \rho_{671} - 7,5 * \rho_{467} + 1)} \right)$	HUETE et al. (2002)
NDVI	$(\rho_{864} - \rho_{671})/(\rho_{864} + \rho_{671})$	ROUSE et al. (1973)
SR	ρ_{864}/ρ_{671}	ROUSE et al. (1973)
MSI	ρ_{1598}/ρ_{823}	HUNT; ROCK (1989)
NDII	$(\rho_{823} - \rho_{1649})/(\rho_{823} + \rho_{1649})$	HUNT; ROCK (1989)
NDWI	$(\rho_{854} - \rho_{1245})/(\rho_{854} + \rho_{1245})$	GAO (1996)
WBI	ρ_{905}/ρ_{973}	PENUELA et al. (1997)
PSRI	$(\rho_{681} - \rho_{498})/\rho_{752}$	MERZLYAK et al. 1999)
CRI	$(1/\rho_{508}) - (1/\rho_{701})$	GITELSON et al. (2002a)
PRI	$(\rho_{529} - \rho_{569})/(\rho_{529} + \rho_{569})$	GAMON et al. (1997)
SIPI	$(\rho_{803} - \rho_{467})/(\rho_{803} + \rho_{681})$	PENUELAS et al. (1995)
RENDVI	$(\rho_{752} - \rho_{701})/(\rho_{752} + \rho_{701})$	GITELSON et al. (1996)
REP	$(\rho_n + 1 - \rho_n)/10$ no de 690-750 nm	CURRAN et al. (1995)
VOG1	ρ_{742}/ρ_{722}	VOGELMANN et al. (1993)
VARI	$(\rho_{559} - \rho_{640})/(\rho_{559} + \rho_{640} - \rho_{467})$	GITELSON et al. (2002b)
VIg	$(\rho_{559} - \rho_{640})/(\rho_{559} + \rho_{640})$	GITELSON et al. (2002b)

¹ ρ é a refletância das bandas mais próximas do sensor Hyperion/EO-1 (n , centro em nm) das formulações originais de comprimento de onda.

2.3 Sistemas sensores

2.3.1 MODerate-resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS)

O MODIS está a bordo dos satélites Terra e Aqua, que passam sobre o equador aproximadamente às 10h30min e 13h30min, respectivamente. As bandas utilizam 490 detectores de Silício (visível e IVP) e de Telúreto de Cádmio e Mercúrio (HgCdTe) (SWIR) distribuídos entre as 36 bandas espectrais no intervalo de 405 a 14385 nm (incluindo o infravermelho termal – TIR). A resolução radiométrica das 36 bandas é de 12 bits. A resolução espacial do MODIS é de 250 (duas bandas), 500 (cinco bandas) e 1000 (29 bandas) metros. Com os dados gerados pelos sensores MODIS, espera-se compreender melhor os fenômenos dinâmicos em escala global, com enfoque nas três grandes áreas: terra, atmosfera e oceanos (XIONG et al., 2005; XIONG; BARNES, 2005; HALL, 2006; National Aeronautics and Space Administration, NASA, 2009).

Devido ao amplo campo de visada nominal de 55° para cada lado, o MODIS recobre uma faixa de visada de 2330 km (passando pelo nadir), e o tempo de revisita varia de um a dois dias (conforme a latitude) (XIONG et al., 2005; NASA, 2009). As características das bandas no visível e do infravermelho próximo (VNIR) e do SWIR são apresentadas na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 – Especificações técnicas das bandas do visível, infravermelho próximo (IVP) e infravermelho de ondas curtas (SWIR) do MODIS/Terra.

Banda	λ inferior (nm)	λ superior (nm)	λ central (nm)	Resolução espacial (m)	Relação sinal ruído
3	459	479	465,6	500	328
4	545	565	553,6	500	330
1	620	670	645,5	250	186
2	841	876	856,5	250	517
5	1230	1250	1241,6	500	161
6	1628	1652	1629,1	500	472
7	2105	2155	2114,1	500	147

Fonte: Adaptado de Xiong et al. (2005) e NASA (2009). λ = comprimento de onda.

Pelo caráter não-Lambertiano (anisotrópico) dos alvos, variações espectrais ocorrem com mudanças nos ângulos de iluminação e de visada nas aquisições sucessivas de imagens. Para amenizar os efeitos da presença de nuvens e da geometria de aquisição de dados, são produzidas imagens-composição de vários dias (p. ex. 8 dias). Detalhes do sensor MODIS são discutidos em Xiong et al. (2005) e nas referências ali citadas.

As imagens reflectância de superfície são corrigidas quanto à influência da atmosfera com base em uma atualização do modelo de transferência radiativa *Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum - 6S* (VERMOTE et al., 1997; VERMOTE; VERMEULEN, 1999). Todos os produtos são fornecidos com parâmetros auxiliares de qualidade do produto (p. ex., ângulos zenitais e azimutais do sensor e do Sol), calculados diariamente ou em composições de vários dias.

Devido ao caráter multidisciplinar do MODIS, além das imagens reflectância de superfície (STRAHLER et al., 1999a; NASA, 2009), diversos produtos são disponibilizados. Entre os principais produtos voltados às aplicações agrícolas estão as imagens dos índices de vegetação NDVI (Produto Vegetation Indices 16-Day L3 Global 250m - MOD13Q1; Vegetation Indices 16-Day L3 Global 500m - MOD13A1; Vegetation Indices Monthly L3 Global 1km - MOD13A3) e EVI (MOD13Q1; MOD13A1; MOD13A3) (HUETE; JUSTICE, 1999); a classificação do uso da terra em biomas pré-estabelecidos (Land Cover Type Yearly L3 Global 500m - MOD12Q1; Land Cover Dynamics Yearly L3 Global 1km - MOD12Q2) (STRAHLER et al., 1999, 1999a, 1999b); e as imagens com estimativas do IAF (Leaf Area Index/FPAR 8-Day L4 Global 1km - MOD15A2) e FPAR (MOD15A2) (KNYAZIKHIN et al., 1999).

2.3.2 Hyperion/EO-1

Lançado a bordo do satélite *Earth Observing-1* (EO-1), em 2000, o Hyperion/EO-1 é o primeiro sensor hiperespectral orbital. Ele se enquadra numa nova tendência de construção de satélites de pequeno porte. O satélite possui órbita Sol-síncrona com 98,2° de inclinação e uma altitude nominal de 705 km. O sensor foi concebido para gerar dados hiperespectrais calibrados para serem utilizados nas investigações científicas e em caráter experimental. Para imagear a superfície o sensor utiliza

tecnologia *pushbroom* com resolução espacial de 30 metros. A faixa imageada tem 7,7 km de largura com comprimento nominal de 42 km. O tempo de revisita do sensor é de 16 dias, mas dependendo do ângulo de apontamento lateral, esse intervalo de tempo pode ser reduzido (BARRY, 2001; PEARLMAN et al., 2003; LENCIONI et al., 2005). Quando são adquiridas fora do nadir (*off-nadir*), as imagens Hyperion/EO-1 retratam os efeitos bidirecionais vistos com dados MODIS (principalmente para AZV superiores a 25°). Esse fato tipicamente ocorre durante o monitoramento de alvos semanalmente.

Fisicamente, o sensor é formado por três subsistemas: conjunto eletrônico; eletrônica de frio-refrigeração e conjunto de sensores. Detalhes sobre cada conjunto foram apresentados por Pearlman et al. (2003). O Hyperion possui um telescópio que direciona a radiação para dois radiômetros. Um radiômetro é dedicado à faixa do VNIR e outro à do SWIR. A relação sinal-ruído (SNR) decresce do visível para o SWIR (p. ex., 550 nm = 1:140; 1225 nm = 1:96; 2125 nm = 1:38) (BARRY, 2001; PEARLMAN et al., 2003).

Na faixa espectral entre 400 e 2400 nm, o Hyperion possui 242 bandas contíguas (apenas 196 são radiometricamente calibradas.) com 10 nm de largura e com resolução radiométrica de 12 bits (BARRY, 2001; PEARLMAN et al., 2003; PEARLMAN, 2003). O sensor possibilita o cálculo de vários índices de vegetação de bandas estreitas, associados com os parâmetros e constituintes bioquímicos e biofísicos da cultura agrícola (p.ex., clorofila, conteúdo de água das folhas, lignina, celulose, IAF), que podem ser potencialmente correlacionados com a produtividade.

2.4 Efeitos bidirecionais

A radiância detectada pelo sensor depende da geometria de iluminação e de visada (efeitos direcionais), da arquitetura dos dosséis, espessura da atmosfera, heterogeneidade interna do campo de visada instantâneo (IFOV; mistura espectral interna em solo), escala de observação (coleta dos dados), do tipo de sensor e dos efeitos do substrato (p.ex. da contribuição do solo ou palha). Em geral, os alvos terrestres não apresentam reflectância isotrópica ou Lambertiana. As diferenças na reflectância podem estar associadas à geometria de iluminação e de visada (MYNENI;

WILLIAMS, 1994; DINER et al., 1999). As variações na reflectância, que estão associadas à geometria de iluminação (ângulos zenital e azimutal de iluminação) e visada (ângulo zenital e azimutal de visada), são definidas por efeitos bidirecionais.

A anisotropia dos dosséis é controlada pelas propriedades ópticas dos elementos da cena e pela estrutura física do alvo e é determinada pela função de distribuição da reflectância bidirecional (BRDF). Assim, além dos determinantes supracitados, a radiância detectada pelo sensor depende ainda das características fisiológicas e morfológicas das folhas e do dossel das plantas. Assim, compreender como esse conjunto de fatores influencia a resposta espectral de alvos agrícolas é importante para permitir a correta interpretação de imagens e evitar erros em estimativas de parâmetros biofísicos da vegetação (KUMAR, 1972; COLWELL, 1974; GOEL, 1988; KUMAR et al., 2001; PONZONI; SHIMABUKURO, 2007).

Os efeitos bidirecionais em folhas têm sido estudados com medidas de laboratório (KUMAR, 1972; WALTER-SHEA et al., 1989; COMBES et al., 2007) e em dosséis agrícolas através de espectrorradiometria de campo (KIMES et al., 1984; SHIBAYAMA; WIEGAND, 1985; WALTER-SHEA et al., 1997) e imagens orbitais (PINTER Jr. et al., 1990; LEROY; ROUJEAN, 1994; PRIVETTE et al., 1996; ASNER et al., 1998; HU et al., 2000; GOBRON et al., 2002; BARET et al., 2007b; GALVÃO et al., 2009; BREUNIG et al., 2011) com diferentes abordagens. Com base nesses estudos, alguns autores propuseram novos índices de vegetação, modelos de interação da radiação eletromagnética nos elementos da vegetação (folhas, hastes, troncos, substrato, etc.) e dosséis, e modelos para estimar parâmetros biofísicos da vegetação. As variações na reflectância dos dosséis agrícolas associadas à geometria de iluminação e de visada podem ser vistas como uma fonte auxiliar de informações ou como um problema que requer correção. Todas essas observações devem ser consideradas no contexto da dinâmica das culturas agrícolas.

Com o aumento do campo de visada do sensor, a radiação eletromagnética percorre uma trajetória maior nos pixels fora do nadir, aumentando a influência da atmosfera. Junta-se a isso a distorção radial, onde pixels da borda podem apresentar um campo de visada

instantâneo (IFOV) maior que o do nadir (p. ex. ≈ 4 vezes para o MODIS), o que acarreta num aumento da mistura espectral. Sensores com amplo campo de visada (p.ex. $\pm 55^\circ$ nominal, do MODIS) retratam os efeitos direcionais, visto que uma metade da cena capta a radiância retroespalhada (menos sombra) e outra a do espalhamento frontal (mais sombra). Esses efeitos de sombra manifestam-se de forma distinta na cena, com variações relacionadas ao comprimento de onda do espectro eletromagnético, à escala de observação, aos parâmetros estruturais e biofísicos do dossel, entre outros.

As propriedades anisotrópicas de culturas agrícolas podem ser vistas como uma fonte auxiliar de informação. Imagens multiangulares permitem a elaboração de composições coloridas falsa-cor de uma única banda (p. ex., vermelho) adquirida em vários ângulos de visada (p. ex. $+30^\circ$, nadir, -30°). Isto possibilita discriminar culturas com base nas informações estruturais e geométricas, estimar parâmetros biofísicos como o IAF e a DAF (CHEN et al., 2003).

2.4.1 Propriedades das folhas e características dos dosséis agrícolas

Nos processos de interação da REM com os dosséis agrícolas é importante considerar dois níveis: nível de folhas (principal elemento espalhador) e dossel (associada a parâmetros geométricos - iluminação e visada; biofísicos – IAF, DAF; espectrais – folhas, hastes, sementes, solo, etc.; relevo e características geométricas do plantio) (GOEL, 1988; DAUDET; TCHAMITCHIAN, 1993; KUMAR et al., 2001). No nível de folha, alguns tecidos são importantes e determinam a absorção, transmissão e reflexão pela vegetação (DI VITTORIO, 2009). Na face ventral está localizada a epiderme superior, precedida de uma camada de cera e de pêlos, denominada cutícula. Na sequência são encontrados o parênquima (mesófilo) paliádico (onde se encontram os pigmentos fotossintetizantes) e o mesófilo esponjoso. Por fim, na face dorsal, estão localizados os tecidos da epiderme inferior, associados a poros estomatais e células guarda (KUMAR, 1972; PONZONI; SHIMABUKURO, 2007). Ao incidir numa folha, a REM pode ser refletida, transmitida ou absorvida. As irregularidades superficiais e ondulações das folhas podem alterar a direção da reflectância em função do sombreamento e “ocultação” de partes da folha (WALTER-SHEA et al., 1989). A

reflexão pode ser especular ou difusa (GOEL, 1988). Alguns modelos de propagação da radiação no interior das folhas foram propostos. A teoria mais conhecida é a de Willstater e Stoll, de 1918, e ainda hoje é válida (PONZONI; SHIMABUKURO, 2007).

O dossel representa o conjunto de elementos da vegetação acima do solo, somando folhas, hastes, caules, sementes, flores, etc. Entre os parâmetros estruturais dos dosséis a DAF, IAF e a distribuição de plantas no terreno são importantes na análise da reflectância dos dosséis agrícolas. Goel (1988) caracteriza a estrutura dos dosséis através de seus parâmetros ópticos (reflectância e transmitância) e estruturais (posição e formas geométricas), geometria de plantio e parâmetros ambientais (temperatura, precipitação, velocidade do vento, umidade relativa). Kimes et al. (1994) apresentaram quatro modelos teóricos de dosséis: esféricos, erectófilos, planófilos e heliotrópicos. Nos dosséis erectófilos há um predomínio de folhas verticais, que tendem a aprisionar os fótons incidentes, reduzindo a reflectância. Nos dosséis planófilos as folhas tendem a se distribuir horizontalmente, aumentando a sua reflectância em relação a dosséis erectófilos. Em geral, as plantas erectófilas apresentam máxima reflectância na direção do retroespalhamento e mínima próxima ao nadir. Nos dosséis planófilos esse efeito é menos pronunciado (KUMAR et al., 2001).

A orientação das linhas de plantio pode ter um forte efeito sobre o sinal detectado pelos sensores remotos (SHIKADA; MIYAKITA, 1992). Culturas agrícolas normalmente são plantadas na forma de linhas com certo espaçamento entre elas (p.ex. soja cultivada com espaçamento de 50 cm, arroz com 30 cm). Assim, a combinação das características da orientação das linhas de plantio, ângulos de iluminação e visada e o estágio fenológico, pode determinar grandes variações na resposta espectral dos dosséis. A direção das linhas de plantio pode alterar a resposta espectral das culturas, especialmente nos estádios iniciais, onde há maior influência do solo na resposta espectral (KOLLENKARK et al., 1982).

Para dosséis esparsos, o solo pode apresentar forte influência na radiância detectada pelos sensores. A contribuição do solo no sinal detectado dependerá do tipo de solo (claro, escuro), da rugosidade do solo e do efeito do sombreamento (GOEL, 1988). O

efeito do sombreamento causado pelas plantas é mais pronunciado na reflectância do visível do que na do IVP. Isso ocorre porque as folhas absorvem muita radiação na região do visível. No IVP, devido à alta transmitância das folhas, o efeito da reflectância do solo é maior. Devido à presença de restos de vegetação não-fotossinteticamente ativos (p.ex. palha) sobre o solo, a contribuição do solo pode ser reduzida. Desta forma, dosséis abertos podem apresentar comportamento espectral semelhante ao da vegetação seca/senescente (ELVIDGE, 1990).

2.4.2 Geometria de iluminação e de visada

A função de distribuição da reflectância bidirecional (BRDF) normalmente é utilizada para caracterizar a reflectância de dosséis agrícolas. Esta função é dependente dos ângulos de iluminação e de visada. Como a BRDF é definida para um ângulo sólido infinitesimal de iluminação e visada, ela não pode ser medida diretamente. Assim, é utilizada uma medida equivalente dada pelo fator de reflectância bidirecional (FRB) (COLWELL 1974; SLATER, 1980; HAPKE, 1981; SCHAEPMAN-STRUB et al., 2006). O FRB é definido como a razão entre a medida de radiância do alvo e a radiância de uma superfície Lambertiana ideal, definidos para um ângulo sólido finito igual e medidos nas mesmas condições de iluminação e observação (Equação 2.1) (SCHAEPMAN-STRUB et al., 2006).

$$FRB(\theta_i, \phi_i; \theta_o, \phi_o; \lambda) = \frac{\text{Radiância alvo } (\theta_i, \phi_i; \theta_o, \phi_o; \lambda)}{\text{Radiância alvo Lambertiano ideal } (\theta_i, \phi_i; \theta_o, \phi_o; \lambda)} \quad 2.1$$

Em que θ_i representa o ângulo zenital de iluminação (equivalente ao AZS), ϕ_i é o ângulo azimutal de iluminação, θ_o é o ângulo zenital de visada (AZV), ϕ_o é o ângulo azimutal de visada e λ é o comprimento de onda. Contudo, para analisar o FRB de um alvo com imagens multiangulares, o fator de reflectância bidirecional anisotrópico (ANIF) deve ser utilizado, visto que possibilita a comparação do FRB das cenas. Ele é obtido através da normalização do FRB obtido fora do nadir pelo FRB medido ao nadir (Equação 2.2). O ANIF permite identificar direções preferenciais de espalhamento e, assim, caracterizar espectralmente o alvo (SANDMEIER et al., 1998; SANDMEIER;

ITTEN, 1999).

$$ANIF = \frac{FRB(fora\ do\ nadir)}{FRB(nadir)} \quad 2.2$$

O ângulo de zenital iluminação/solar (θ_i ou AZS) é formado entre a normal local e o vetor representativo da trajetória do fóton da origem até o alvo (Figura 2.2 a). Seus valores podem variar de 0° a 360° . O ângulo azimutal de iluminação (ϕ_i) é dado pelo ângulo formado (à direita) entre o vetor Norte local e o vetor que representa a trajetória do fóton. Os valores podem variar de 0° a 360° . Em relação à geometria de visada (Figura 2.2 b), o ângulo zenital de visada (θ_o) é formado entre a normal local e o vetor que une o alvo e o sensor. Seus valores podem variar de 0° a 90° . O ângulo de visada azimutal (ϕ_o) é dado pelo ângulo formado entre o norte local e o vetor de observação projetado na superfície.

A radiação que atinge os dosséis pode ser direta (não sofreu absorção e espalhamento da atmosfera) ou difusa (espalhada na direção da superfície pela atmosfera). A radiação direta atinge os elementos detectores do sensor é definida por um ângulo zenital (geometria de iluminação), enquanto que a difusa geralmente é assumida como sendo isotrópica (HOLBEN; FRASER, 1984; GOEL, 1988).

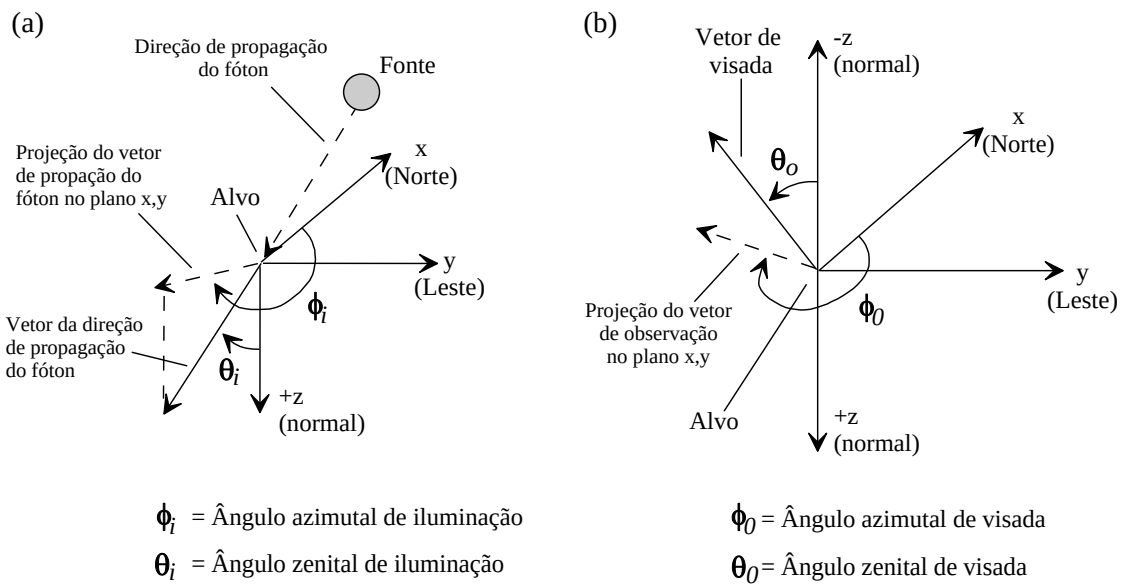


Figura 2.2 – Ilustração dos ângulos da (a) geometria de iluminação - AZS (b) e visada - AZV. Fonte: Adaptado de LEWICKI et al. (2004).

Num estudo que procurou identificar os melhores ângulos de visada para aplicações agrícolas, Kimes et al. (1984) destacaram que sensores que têm visadas fora do nadir permitem aumentar o tempo de revisita e a determinação de parâmetros estruturais do dossel. Para dosséis fechados (97% de cobertura do solo), os autores verificaram que não é possível definir um ângulo azimutal de iluminação ótimo. Para o ângulo zenital de iluminação, menores ângulos parecem ser mais indicados. Por outro lado, para dosséis esparsos, com forte contribuição do solo, o ângulo azimutal de iluminação apresentou grandes diferenças, sendo que o plano principal de iluminação permitiu a extração de uma maior quantidade de informações físicas dos alvos. Para ângulos zenitais elevados, dosséis com alta cobertura do solo e dosséis com cerca de 50% de cobertura tendem a produzir respostas semelhantes devido ao baixo espalhamento do solo (KIMES et al., 1984). Campos (2009) observou que existe uma tendência de as folhas apresentarem orientação azimutal ortogonal às linhas de plantio com objetivo de aumentar a sua exposição à luz.

Como os biomas se distribuem de acordo com a latitude, cabe observar que os dados coletados em uma determinada latitude para uma mesma data, podem ser tendenciosos devido à amplitude de variação da geometria de iluminação e de visada (MEYER et al., 1995). Com base nessas informações, cabe destacar que estimativas globais devem considerar variações associadas aos efeitos bidirecionais e que existe uma grande dificuldade na validação dos modelos e/ou estimativas globais.

O efeito *hot spot* pode influenciar significativamente a resposta espectral da vegetação. Esse efeito ocorre quando a geometria de visada e de iluminação são coincidentes. Assim, na direção do retroespalhamento verifica-se o máximo de dossel iluminado (mínimo de sombra está presente). Essa combinação faz com que a reflectância seja máxima na direção do hot spot (MARSHAK, 1989; CHEN; CIHLAR, 1997; ROUJEAN, 2000).

2.4.3 Relações da geometria de iluminação e visada com a atmosfera

Considerando que parte da anisotropia dos dosséis agrícolas está associada aos efeitos atmosféricos (PINTER Jr. et al., 1990), uma breve discussão sobre os efeitos bidirecionais e a atmosfera é apresentada. Na atmosfera, a REM pode ser absorvida, espalhada ou transmitida (KAUFFMAN, 1989; GAO et al., 1993). As geometrias de iluminação e visada influenciam diretamente a distância que a REM percorre na atmosfera.

Quando Holben e Fraser (1984) analisaram a reflectância do vermelho e IVP com dados simulados para o sensor AVHRR, de imediato destacaram a importância dos processos de espalhamento e absorção da REM pelos constituintes da atmosfera, associados aos amplos campos de visada. Os resultados obtidos pelos autores mostraram que as características de iluminação e de visada na estação do verão minimizam os efeitos atmosféricos. Isso é explicado pela menor distância percorrida pela radiação na atmosfera. Além disso, mostraram que o aumento da concentração de aerossóis provoca um aumento da radiância detectada pelo sensor para as bandas do vermelho e IVP, especialmente na direção do espalhamento frontal. O efeito da atmosfera é maior na direção do espalhamento frontal do que do retroespalhamento (KIMES et al., 1984) devido à menor magnitude do sinal detectado.

Apesar de os índices de vegetação diminuírem os efeitos atmosféricos, sua influência não é totalmente corrigida (EPIPHANIO; HUETE, 1995; MEYER et al., 1995). Os efeitos atmosféricos produzem contribuições aditivas e subtrativas para as bandas do visível e IVP, respectivamente (MYNENI; WILLIAMS, 1994; MEYER et al., 1995), e podem super/subestimar índices de vegetação. Assim, em medidas de REM realizadas com ângulos de iluminação e de visada distintos (p. ex. retroespalhamento ou espalhamento frontal), a correção atmosférica deve ser conduzida para reduzir os efeitos bidirecionais associados à radiância detectada pelo sensor (CIHLAR et al., 1994). Os autores verificaram que após aplicar a correção atmosférica nas imagens AVHRR, os valores de NDVI aumentaram e as variações com o aumento do ângulo zenital do sensor diminuíram.

2.4.4 Contribuição do substrato

Os efeitos da geometria de iluminação e de visada sobre a reflectância são mais pronunciados nos estádios iniciais dos cultivos agrícolas. Nessa fase, o solo e a vegetação não-fotossinteticamente ativa (NPV²) ainda estão expostos e gradativamente são encobertos pelo dossel. Conforme a cobertura de vegetação aumenta, a contribuição do solo é reduzida. O efeito do NPV foi discutido em detalhe por Elvidge (1990).

Devido a características físicas do solo, a anisotropia do solo é maior para a radiação de comprimentos de onda mais curtos e pode levar a interpretações e estimativas errôneas se tais características não forem consideradas (HUETE, 1996). A resposta espectral do solo é controlada pelas propriedades químicas e físicas, textura/rugosidade, teor de matéria orgânica e umidade (BEN-DOR et al., 1999). Quando o solo que está subjacente a dosséis agrícolas parcialmente fechados contribui para o total da radiância detectada pelo sensor, o efeito do sombreamento das plantas e do próprio solo (partículas e agregados) é o principal fator que afeta a resposta espectral, considerando a geometria de iluminação (HUETE, 1996). Em geral, a reflectância do solo está diretamente relacionada com o aumento do ângulo zenital de visada na direção do retroespalhamento. Um estudo de Huete (1996) com frações finas de areia (< 2 mm) mostrou um forte espalhamento na direção frontal, enquanto que solos argilosos apresentaram maior retroespalhamento. O autor ainda apresentou uma discussão a respeito da escala de observação e dos efeitos topográficos.

2.4.5 Variações na escala de observação associadas à geometria de observação

No contexto dos efeitos bidirecionais, as variações de escala são dadas pelas variações do Campo de Visada Instantâneo (IFOV) projetado na superfície e representado nas imagens multiangulares e pelas distintas escalas de coleta de dados utilizadas nos estudos agrícolas a partir de sensoriamento remoto e suas respectivas validações (nível terrestre, aéreo e orbital). A transição de uma escala local para global e do global para local, requer cuidados durante a análise das imagens e durante os tratamentos estatísticos (RAFFY, 1992). Comparações de medidas de reflectância apresentadas por

² Refere-se a toda vegetação seca (p.ex. palha, restos de caules, hastes, cascas, etc.).

Colwell (1974) mostraram as diferenças entre a reflectância de folhas isoladas e de dosséis. As medidas de dossel sempre apresentaram menores valores de reflectância, especialmente devido ao efeito do sombreamento mútuo.

Como a relação entre parâmetros biofísicos e o FRB está diretamente associada à escala de observação (associado ao nível de coleta dos dados, p.ex. terrestre, aéreo ou orbital), as alterações nessa escala implicam em mudanças ópticas e estruturais do alvo, geométricas (iluminação e visada), atmosféricas (contribuição da atmosfera) e de mistura espectral dentro dos pixels (heterogeneidade) (QI et al., 1995). Em imagens com amplo campo de visada, as distorções radiais modificam a escala de observação do centro para as bordas da cena (RAFFY, 1992; MALLON; WHELAN, 2004; GARRIGUES et al., 2006). Os efeitos radiais foram discutidos por Woodcock e Strahler (1987) e uma discussão sobre modelos e escala em sensoriamento remoto (efeito de mistura) foi feita por Strahler et al. (1986).

Em termos de validação, análises sobre os métodos diretos e indiretos de estimativa de IAF e FAPAR (Fração absorvida da radiação fotossinteticamente ativa) apresentada por Gower et al. (1999) mostraram que os diferentes métodos geram valores distintos e com diferenças significativas. Assim, como a estimativa de parâmetros biofísicos com dados de sensoriamento remoto passa por uma etapa de validação dos resultados, geralmente com dados locais, essas diferenças devem ser consideradas. Pinter Jr. et al. (1990) avaliaram a relação entre escalas de coleta de campo, aéreo e orbital. Os resultados apresentaram forte concordância entre os níveis de campo e aéreo. Entretanto, o nível orbital apresentou grandes diferenças do FRB em relação às medidas de campo e aéreas, especialmente para visadas fora do nadir.

2.4.6 Impacto dos efeitos direcionais no comportamento espectral de dosséis agrícolas na faixa espectral de 400-2500 nm

A interação da REM com a vegetação é dependente das regiões espectrais e é caracterizada pelo padrão de espalhamento de cada alvo (função de fase). Na região do visível (400 - 700 nm), a resposta espectral é controlada principalmente pelos pigmentos das folhas. No IVP (700 – 1100 nm), a resposta espectral depende essencialmente da

estrutura interna das folhas. Na região do SWIR (1100 – 2500 nm), o conteúdo de água dentro das folhas é que controla a resposta espectral. Os efeitos bidirecionais alteram principalmente a quantidade de sombra “vista” pelo sensor e a distância ótica percorrida pela radiação dentro do dossel (*G-function*) e, a magnitude desse efeito é dependente do comprimento de onda.

A influência do sombreamento sobre o FRB nas diferentes regiões do espectro varia de acordo com a transmitância das folhas. Para plantas com folhas mais transparentes (sombra mais “clara”) o impacto relativo será menor do que para folhas mais opacas (sombra mais “escura”). Como a transmitância no visível é de aproximadamente 5% e no IVP de aproximadamente 45%, o efeito do sombreamento do visível é muito maior. Além disso, quando o solo é escuro, o impacto da sombra sobre a reflectância é menor. Apesar de o IVP ser menos afetado pelo sombreamento mútuo nos dosséis, ele deve ser considerado. No visível o sombreamento provoca forte redução do FRB e no IVP a redução é menos acentuada (COLWELL, 1974). Contudo, para alguns tipos de dosséis erectófilos (p.ex. trigo), a reflectância de hastes e espigas pode provocar aumento da reflectância no visível com o aumento do ângulo de iluminação e/ou visada (APARICIO et al., 2004). Variações na transmitância e reflectância de folhas na fase de senescência provocam aumento da reflectância no visível quando a vegetação seca e redução da reflectância no IVP.

Um estudo com ângulos de incidência de 20°, 45° e 60° reportado por Kumar (1972) indicou que a reflectância de superfície das folhas é especular e que ela é mais pronunciada à medida que os ângulos de incidência aumentam. A reflectância especular pode variar de 10% (soja) a 50% (sorgo e milho) na região do visível dependendo do ângulo de incidência. Na região do IVP, devido à presença da cutícula, a componente especular é muito menor (GOEL, 1988). Entre as cultivares de trigo estudadas por Pinter Jr. et al. (1985) foi verificado que dosséis erectófilos e planófilos apresentam reflectância bastante distinta no visível com relação ao ângulo de iluminação solar. As plantas erectófilas apresentaram maiores modificações do espectro do visível durante o meio dia local (aumento da reflectância). Para o IVP foi verificado que o máximo da reflectância para todos os dosséis ocorreu 2 a 3 horas antes e depois do meio dia. No

SWIR foi verificado um aumento da reflectância até as 10 horas e um nivelamento no resto do dia.

2.4.7 Variação dos efeitos direcionais ao longo do ciclo fenológico das culturas agrícolas

Os dosséis agrícolas apresentam uma dinâmica temporal que está parcialmente representada na Figura 2.3. Esta figura retrata: a fase de pré-plantio (Figura 2.3 a), onde o solo está bastante liso (gradeado); o período logo após o plantio (Figura 2.3 b), com lineamentos do solo (pequenas ondulações) associados ao processo de plantio; o período de alguns dias após a emergência das plantas (Figura 2.3 c), em que a sombra passa a influenciar; plantas em crescimento mais avançado (Figura 2.3 d), em que dependendo da geometria de iluminação e visada o sensor pode ou não imagear áreas sombreadas; fechamento do dossel (Figura 2.3 e), em que os efeitos bidirecionais são reduzidos. À medida que o dossel fecha (com redução da participação do substrato) os efeitos direcionais são reduzidos (WALTER-SHEA et al., 1997). A orientação das linhas de plantio afeta o FRB principalmente nos estádios iniciais (COLWELL, 1974; SHIKADA; MIYAKITA, 1992), quando as linhas são mais bem definidos.

Apesar de Kimes et al. (1984) e Aparicio et al. (2004) mostrarem que o NDVI reduz os efeitos da geometria de iluminação e observação, os efeitos não são removidos completamente. Epiphany e Huete (1995) mediram a reflectância de dosséis de alfafa em campo com distintas configurações de geometria de iluminação e de visada e posteriormente avaliaram a dependência dos índices de vegetação desses efeitos. O ângulo zenital solar produziu variações na FAPAR, no NDVI e no índice de vegetação ajustado ao solo (*Soil-Adjusted Vegetation Index* - SAVI) para mesmas classes de cobertura (cobertura do solo). Variações no NDVI foram associadas principalmente ao solo (*background*) e no SAVI aos parâmetros geométricos.

O efeito do ângulo de visada sobre o NDVI, *simple ratio* (SR) e *Photochemical Reflectance Index* (PRI) é diretamente relacionado com o aumento do IAF (APARICIO et al., 2004) devido ao comportamento diferenciado das bandas do vermelho (absorve mais REM) e IVP (reflete mais REM). Goel e Reynolds (1989) avaliaram o uso das

bandas do visível e do IVP para classificar dosséis de cultivos de soja e milho em diferentes estádios fenológicos. Os resultados mostraram que ao utilizar ambas as bandas, a discriminação das culturas melhorou. Contudo, identificaram algumas dificuldades na classificação das variedades quando estas estavam nos estádios iniciais de desenvolvimento. Apesar de não terem apresentado resultados conclusivos, os autores identificaram os efeitos dos ângulos de iluminação (zenital e azimutal) na reflectância como sendo fontes de mudanças nesses dosséis.

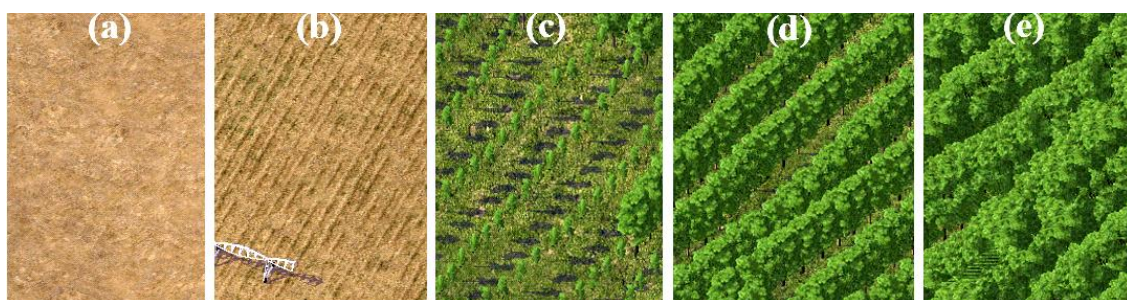


Figura 2.3 – Evolução da cobertura do solo em áreas agrícolas. (a) solo exposto antes do plantio; (b) solo exposto com orientação de plantio; (c) culturas perenes após o brotamento; (d) culturas perenes em médio desenvolvimento; (e) culturas perenes com dossel fechado/completo.

2.4.8 Abordagem geral da radiação de cena em cultivos agrícolas

Em nível de dossel, o espalhamento da vegetação é anisotrópico devido às características espectrais e estruturais dos dosséis. Essas características permitem que sejam derivadas informações estruturais a partir de dados de sensoriamento remoto (KUMAR et al., 2001). O FRB pode ser obtido em diferentes níveis de observação (nível terrestre, aéreo ou orbital) e, conseqüentemente, com distintos níveis de mistura espectral dentro de cada elemento de resolução (IFOV). A heterogeneidade espectral associada a essa mistura, segundo Myneni e Williams (1994), é dada pela distribuição espacial da área foliar, fração de cobertura, variações associadas à DAF e pelas propriedades ópticas das folhas, e outros elementos do dossel.

Composições falsa-cor elaboradas com base numa mesma banda vista em três ângulos de visada distintos podem retratar as informações estruturais dos alvos. Barnsley et al. (1997) mostraram que diferentes cultivos com diferentes frações de cobertura do solo e

estádios fenológicos podem ser discriminados nessas composições. As diferenças de cores nas imagens estão associadas a parâmetros bidirecionais. De acordo com os resultados apresentados por Barnsley et al. (1997), a banda do IVP apresenta a menor variância associada a efeitos bidirecionais, enquanto que as bandas do vermelho, infravermelho médio e verde apresentam maior quantidade de informação associada aos efeitos direcionais.

Parâmetros biofísicos como o IAF afetam diretamente a reflectância no visível. Conforme o IAF aumenta, a absorção pelos pigmentos na faixa espectral do visível aumenta quase exponencialmente, até atingir valores de saturação (IAF de 2 ou 3), onde a absorção passa a ter um comportamento assintótico (GOEL, 1988). Em geral, o efeito do ângulo zenital solar nas bandas do visível está associado à maior ou menor exposição de folhas verdes, acarretando numa maior ou menor absorção por pigmentos. Essas relações dependem da orientação das linhas de plantio, da cobertura do solo, da altura das plantas, etc. (JACKSON et al., 1979). Com relação à fração de cobertura do solo, a banda do vermelho passa a não apresentar mudanças no FRB medido ao nadir para frações de cobertura superiores a 65% e 81% e ângulos zenitais de iluminação de 50° e 10°, respectivamente (COLWELL, 1974).

Em relação à DAF, imagens obtidas na direção do retroespalhamento apresentam um maior brilho. O extremo é verificado quando a fonte de iluminação está exatamente atrás do sensor, criando o efeito *hot spot* (GOEL, 1988). A resposta espectral da vegetação no IVP é menos afetada pela orientação das linhas de plantio (maior transmitância das folhas). Contudo, a REM das bandas do visível são bastante afetadas (JACKSON et al., 1979). Em síntese, a reflectância da vegetação na região espectral do vermelho possui correlação negativa com o fechamento do dossel (inclusive com o IAF), enquanto que o IAF apresenta correlação positiva com a reflectância da banda do IVP.

Quando o ângulo de visada está perpendicular às linhas de plantio, os efeitos do solo/substrato são minimizados. Ângulos azimutais de iluminação associados ao plano principal de espalhamento e paralelos às linhas de plantio reduzem o sombreamento. O

aumento do ângulo zenital de iluminação provoca maior sombreamento, principalmente quando o azimute de iluminação está perpendicular às linhas de plantio. Jackson et al. (1979) mostraram que a reflectância de plantios de trigo cultivados sem orientação das linhas de plantio (aleatório) é menos afetada pelos ângulos zenital e azimutal solar e pela geometria de visada. As maiores variações da reflectância em função da geometria de visada foram observadas em horários próximos ao meio dia. Para dosséis fechados e solo exposto, o efeito da geometria de iluminação sobre a reflectância foi baixo.

Medidas de reflectância de dosséis de trigo para o intervalo espectral de 350 a 1100 nm apresentaram valores superiores para visada fora do nadir ($\approx 30^\circ$) em relação ao nadir (APARICIO et al., 2004). Os autores atribuíram o aumento à maior quantidade de biomassa exposta. Na região espectral do visível os elementos da planta como hastes, espigas e caules aumentaram a reflectância. Por outro lado, no IVP, o aumento na reflectância foi associado ao aumento da biomassa de folhas (IAF), que aumentou o espalhamento interno. Em outras situações, o aumento da reflectância em ambas as regiões espectrais (visível e IVP) pode estar associado ao espalhamento molecular e à presença de aerossóis na atmosfera (EPIPHANIO; HUETE, 1995), ou mesmo, conforme resultados apresentados por Aparicio et al. (2004), à estrutura vertical dos dosséis.

2.4.9 Efeito da geometria de iluminação e de visada nos índices de vegetação e nas estimativas de parâmetros biofísicos

Índices de vegetação podem variar muito com os efeitos bidirecionais. Consequentemente, as estimativas de variáveis biofísicas derivadas desses índices de vegetação podem apresentar distorções significativas (PINTER Jr. et al., 1990; VERRELST et al., 2008). Estudos de Epiphanio e Huete (1995) mostraram que o NDVI é mais apto a detectar mudanças biofísicas associadas a baixos valores de reflectância nas regiões espectrais do vermelho e IVP (reflectância $<0,1$ e $<0,3$, respectivamente) e o SAVI apresentou melhor correlação com o IVP, tendo em vista que não apresentou comportamento assintótico.

Apesar de reduzir, o NDVI não elimina os efeitos do sombreamento porque a

transmitância não é igual para as regiões do visível e IVP (COLWELL, 1974). Em geral, o NDVI e SR aumentam da direção do retroespalhamento para a do espalhamento frontal (máximo em torno de 20° a 30° frontal). Assim, os valores dos índices de vegetação são dependentes e válidos para uma determinada geometria de iluminação e visada (WALTER-SHEA et al., 1997).

As relações dos índices de vegetação com o IAF estão associadas à geometria de iluminação e observação. Índices de vegetação derivados do espalhamento frontal apresentam menor correlação com o IAF devido à variação do IVP nessa direção de espalhamento. As maiores correlações ocorrem com índices de vegetação do retroespalhamento com ângulo zenitais de visada de aproximadamente 30° (Walter-Shea et al., 1997). Esses autores reportaram que a maior sensibilidade do NDVI em relação ao IAF ocorre para ângulos zenitais de visada retroespalhados com valores baixos ($\approx 10^\circ$).

Aparicio et al. (2004) mostraram que existem diferenças significativas entre a reflectância dos dosséis de trigo irrigado e trigo de sequeiro, com medidas tomadas ao nadir e com ângulo de visada de 30°. O trigo irrigado apresentou maiores variações de reflectância no visível e o trigo de sequeiro no IVP em função do AZV. Os autores não discutem as causas, mas pode-se especular que para a região do visível o maior IAF ($\approx 4,4$) leva a um aumento da absorção pelos pigmentos. O trigo de sequeiro ($IAF \approx 2,1$) apresenta menor quantidade de espaços vazios e água no mesófilo, o que reduz o espalhamento interno da folha e, conseqüentemente, a reflectância no IVP (APARICIO et al., 2004).

Os resultados da modelagem de dosséis feita por Sellers (1987) mostraram que, em condições de solo escuro, o aumento do IAF não provocou significativas mudanças na reflectância do vermelho. Contudo, devido ao alto espalhamento, o aumento do IAF provocou significativos aumentos da reflectância no IVP. Com base em resultados semelhantes, Gitelson (2004) aplicou com sucesso um fator multiplicativo à banda do IVP para linearizar o ajuste entre o IAF e o NDVI. Desta forma, conseguiu reduzir o efeito da saturação à medida que o IAF aumentava (≈ 5).

Índices de vegetação derivados de imagens de reflectância e relacionados à biomassa tendem a apresentar valores crescentes à medida que aumenta o sombreamento nos dosséis (APARICIO et al., 2004). Outra constatação dos autores mostrou que índices calculados com base numa única região espectral (ex. visível ou IVP) (NDWI, PRI e NPCI) apresentam menor variação do que índices que utilizam a reflectância medida em mais de uma região (NDVI, SR) em relação à geometria de visada e iluminação. Myneni e Williams (1994) concluíram que existe uma relação linear entre NDVI e FAPAR. Contudo, quando são utilizados dados orbitais, os efeitos bidirecionais e atmosféricos devem ser corrigidos ou considerados durante a análise.

Meyer et al. (1995) mostraram que existe uma tendência no sentido de selecionar valores de NDVI derivados de imagens obtidas na direção do espalhamento frontal em composições de 16 dias do sensor AVHRR (variações absolutas de até 0,15 no NDVI) quando o procedimento de máximo valor é utilizado. Para reduzir o efeito da atmosfera, composições temporais (p. ex. 8 e 16 dias do MODIS) geralmente utilizam os pixels com maior valor de NDVI no intervalo de tempo da composição. Considerando o NDVI, Holben e Fraser (1984) mostraram que as diferenças entre NDVI calculadas para dados simulados para a direção do espalhamento frontal e retroespalhamento aumentam com o aumento do ângulo de visada. Os maiores valores de NDVI foram obtidos para o espalhamento frontal e os menores para o retroespalhamento.

2.4.10 Efeitos da geometria de iluminação e de visada sobre a reflectância da soja

Em relação à distribuição angular das folhas, a soja é considerada uma cultura planófila com movimentos heliotrópicos que deixam as folhas mais perpendiculares à REM no início da manhã e no final da tarde. Ao aproximar do meio dia, a DAF é alterada para reduzir a interceptação da REM em aproximadamente 25%, dependendo da variedade (ROSA; FORSETH, 1995). Em termos de plantio, a soja é plantada em linhas, onde o espaçamento tipicamente varia de 30 cm a 75 cm (HEIFFIG et al., 2006). Rosa e Forseth (1995), ao estudar a variação do ângulo de orientação azimutal das folhas de variedades de soja ao longo do ciclo fenológico, verificaram que o ângulo de orientação azimutal não apresentou diferenças. Contudo, como esse estudo foi realizado com

plantas cultivadas em vasos, o efeito do espaçamento, tipicamente utilizado para aumentar a interceptação de REM pelo dossel e reduzir o desenvolvimento de ervas daninhas não foi considerado pelos autores (HEIFFIG et al., 2006; CAMPOS, 2009).

Rosa e Forseth (1995) não identificaram uma distribuição azimutal preferencial nos cultivos de soja. Blad e Baker (1972) analisaram a distribuição e orientação de folhas em dosséis de soja e verificaram que a soja é planófila na maior parte do seu ciclo, com exceção dos estádios inicial e final, onde a DAF apresenta diferentes classes. Isso, *a priori*, indica que a soja tende a apresentar maior FRB nos estádios intermediários para o IVP e uma maior absorção no vermelho, considerando um mesmo IAF. A FAPAR é interceptada por aproximadamente um terço do IAF da camada superior dos dosséis da soja (HATFIELD; CARLSON, 1978) e apresenta uma relação quase linear como o NDVI (KNYAZIKHIN et al., 1999).

Em estudos conduzidos em laboratório, Walter-Shea e Norman (1989) mediram o FRB de folhas de soja variando a geometria de iluminação e de visada e verificaram que, com o aumento do ângulo zenital de visada (AZV), ocorre um aumento no FRB. A máxima reflectância é verificada no plano principal de espalhamento na direção do espalhamento frontal e o mínimo FRB ocorre ao nadir. Os resultados mostraram que o fator de transmitância é menos afetado pela geometria de iluminação e de visada (WALTER-SHEA; NORMAN, 1989). A maior variação do FRB em função do ângulo zenital solar ocorre quando o azimute solar e a orientação das linhas de plantio são paralelos (KOLLENKARK et al., 1982).

Como dosséis de soja apresentam comportamento anisotrópico, a radiância detectada pelo sensor é dependente das propriedades de espalhamento dos elementos da planta e do substrato. Deve-se ainda considerar a proporção do alvo iluminada e sombreada (WALTER-SHEA; NORMAN, 1989; SHIKADA; MIYAKITA, 1992). Os parâmetros geométricos afetam de forma diferenciada dosséis de soja fechado e abertos (com contribuição do substrato). A reflectância dos comprimentos de onda em que a vegetação apresenta baixa absorção (p. ex. IVP) é menos afetada pela geometria. Isso parece estar associado à alta transmitância e ao espalhamento múltiplo da radiação, que

ocorre nas folhas e dosséis das plantas.

Ranson et al. (1985) estudaram os efeitos de iluminação e de visada nos espectros de FRB da soja, tomados com distintos ângulos. Os resultados para dosséis abertos mostraram que para a reflectância do vermelho ocorreu uma diminuição do FRB à medida que o ângulo zenital de visada aumentou, até aproximadamente 30°. Para o IVP, identificaram uma diminuição menor até ângulos zenitais de visada de 30°. Esse resultado foi atribuído à diminuição da contribuição do solo e ao efeito do espalhamento múltiplo. Por outro lado, para dosséis de soja fechados, o aumento do ângulo zenital de visada provocou um aumento do FRB em todas as bandas.

À medida que há um fechamento do dossel da soja, a reflectância da visada ao nadir é proveniente principalmente do estrato superior de folhas. Nessas condições, o sombreamento mútuo afeta mais a banda do vermelho do que a do IVP (KOLLENKARK et al., 1982; RANSON et al., 1985) e modifica os pontos de máxima reflectância – *hot spot* (JUPP; STRAHLER, 1991). Medidas feitas com ângulos zenitais de visada fora do nadir (15°, 30°, 45° e 60° e ortogonais às linhas de plantio) por Ranson et al. (1985) mostraram que o FRB derivado do retroespalhamento sofre variações mais significativas e apresenta valores maiores do que a reflectância proveniente do espalhamento frontal. Em todas as observações, as mudanças do FRB de dosséis fechados foram menores do que em dosséis abertos. O menor FRB está diretamente relacionado à contribuição do sombreamento, tanto do dossel quanto do solo. O aumento gradual no FRB com o aumento do ângulo de iluminação parece estar associado à componente especular do dossel (tanto no vermelho quanto no IVP).

2.5 Modelos de simulação de reflectância de dosséis agrícolas e estimativa de parâmetros biofísicos

Os modelos permitem uma maior compreensão da interação da REM com os elementos dos dosséis e dentro dos dosséis. Assim, através de modelos, é possível isolar e avaliar a influência dos ângulos de iluminação e de visada ou modificar as estruturas dos dosséis. Goel (1988) agrupou os modelos em quatro tipos: geométricos, de meio turbido, híbridos e modelos simulados computacionalmente. A inversão desses modelos permite

estimar parâmetros biofísicos da vegetação. Contudo, a solução do problema inverso passa pela coleta ou simulação de dados multiangulares. Esses dados podem ser obtidos por sensores que coletam imagens em vários ângulos praticamente no mesmo instante (p. ex., *Multi-angle Imaging SpectroRadiometer* - MISR) ou através de composições (p.ex., uma semana) feitas a partir de imagens de sensores com amplo campo de visada (MODIS, AVHRR) (QI et al., 1995).

Modelos geométricos são caracterizados por assumirem formas geométricas definidas para modelar a parcela do dossel iluminada e a parcela sombreada, distribuídas de forma orientada ou aleatória sobre um substrato de reflectância conhecida. Os modelos geométricos são mais apropriados para dosséis esparsos (GOEL, 1988). Outros detalhes sobre modelos geométricos são apresentados por Nilson e Kuusk (1989) e Holben e Fraser (1984). Os modelos de meio túrbido assumem camadas horizontais contínuas, uniformes e homogêneas para caracterizar os dosséis. Para modelar a REM nesses dosséis hipotéticos, os modelos podem utilizar a teoria da transmitância média dos dosséis, equações de transferência radiativa ou a combinação de ambas (GOEL, 1988). O modelo de meio túrbido mais conhecido é o SAIL proposto por Verhoef (1984). Ao integrar os modelos geométricos com os modelos de meio túrbido, obtêm-se os modelos híbridos. Esses modelos procuram modelar a estrutura geral do dossel com formas geométricas (cones, cilindros, esferas). A transferência da REM no interior do dossel é modelada como um meio túrbido. Esses modelos são mais adequados por permitirem simular os efeitos bidirecionais dentro da folha, a trajetória da REM de acordo com características estruturais como o IAF e DAF de uma determinada espécie e obter boas aproximações da radiação de cena (GOEL, 1988; XIAOWEN et al., 1995). Por fim, os modelos computacionais incluem uma componente estocástica para determinar características das folhas (tamanho, forma), estruturais (IAF e DAF) e/ou a distribuição dos dosséis na superfície (GOEL, 1988).

Entre os modelos mais utilizados estão o PROSPECT, por exemplo, aplicado a folhas (JACQUEMOUD; BARET, 1990) e o SAIL, dedicado à simulação da reflectância de dosséis (VERHOEF, 1984; VERHOEF et al., 2007) ou à integração dos dois: PROSAIL (JACQUEMOUD et al., 2009). Apesar do embasamento físico dos modelos de

transferência radiativa (RT), a solução passa pela correta caracterização de cada tipo de dossel. Um exemplo é o uso de um determinado modelo para cada um dos oito grandes biomas (MOD43) e gerar os produtos IAF e FAPAR dos produtos MODIS (MYNENI et al., 2002).

Para a estimativa de parâmetros biofísicos, diferentes modelos têm sido adotados: modelos empíricos e modelos baseados em transferência radiativa. A estimativa de parâmetros através de modelos empíricos geralmente é feita por modelos de regressão entre as variáveis biofísicas medidas em campo e a reflectância ou índices de vegetação (QI et al., 1995). Esses modelos são de fácil elaboração, mas limitados a uma abrangência local, demandando muitas medidas de campo por cultura. Estimativas globais de IAF, FAPAR e da produtividade primária, que são realizadas pelo programa *Earth Observing System* (EOS), têm com base modelos empíricos, quando o modelo de transferência radiativa falha (MYNENI et al., 1997; KNYAZIKHIN et al., 1999; MYNENI et al., 2002). O uso de composições temporais (p. ex. 8 dias) pode levar à seleção preferencial de pixels do espalhamento frontal, o que provoca um aumento nos índices de vegetação (p. ex. NDVI) e, conseqüentemente, a uma superestimativa dos parâmetros biofísicos estimados através de modelos empíricos (MEYER et al., 1995). Os efeitos bidirecionais geralmente são indesejáveis em modelos empíricos.

Por outro lado, estimativas de parâmetros biofísicos por meio de modelos de transferência radiativa (RT) podem levar a resultados fisicamente coerentes e passíveis de generalização entre escalas (SELLERS, 1987). Os modelos de transferência radiativa (RT) são matematicamente mais elaborados e computacionalmente mais exigentes e requerem a coleta de imagens em diferentes ângulos de iluminação ou visada. A vantagem dos modelos RT é a possibilidade de explorar as propriedades físicas medidas por sensores e inverter as equações para estimar parâmetros biofísicos da vegetação (QI et al., 1995). O modelo RT proposto por Knyazikhin et al. (1998a, b) utiliza as informações angulares (bidirecionais) e espectrais para estimar parâmetros biofísicos, com base em imagens do *Multangle Imaging SpectroRadiometer* (MISR) e do MODIS.

2.6 PROSAIL

Os modelos de transferência radiativa ajudam a compreender como ocorrem os processos de interceptação e reflexão da radiação (e parâmetros derivados) pelas plantas e sua relação com parâmetros biofísicos (JACQUEMOUD et al., 2009; KURZ; HELLWICH, 2000). Nesta linha, a união do modelo de transferência de radiação dentro de folhas denominado PROSPECT (JACQUEMOUD; BARET, 1990; JACQUEMOUD et al., 1996; FOURTY et al., 1996; BARET; FOURTY, 1997; BOUSQUET et al., 2005; FÉRET et al., 2008) e do modelo de transferência radiativa de dosséis denominado SAIL (VERHOEF, 1984, 1985; VERHOEF et al., 2007; VERHOEF; BACH, 2003, 2007) resultou no PROSAIL (JACQUEMOUD et al., 2006; JACQUEMOUD et al., 2009). O PROSAIL utiliza uma série de parâmetros de entrada, associados à composição das folhas (concentração de clorofila *a* e *b* (*Cab*), carotenoides, pigmentos marrons, água, etc), parâmetros estruturais da folha (*N*) e do dossel (DAF, IAF), reflectância do solo, e radiação difusa e parâmetros associados às geometrias de iluminação e de visada, representada pelo ângulo zenital de iluminação (AZS), ângulo zenital de visada (AZV) e ângulo azimutal relativo (AAR), e pela simulação do efeito do hot spot (JACQUEMOUD et al., 2009). O conjunto de parâmetros de entrada utilizados pelo PROSAIL é apresentado na Tabela 2.3 e discutido pelos autores supracitados. Em geral, os parâmetros que operam em nível de folha são modelados pelo PROSPECT e os parâmetros associados ao dossel e à geometria são modelados pelo SAIL (JACQUEMOUD et al., 2009). Alguns desses parâmetros serão discutidos na sequência com mais detalhe.

No PROSAIL, os efeitos da *Cab* apenas afetam a faixa espectral do visível (Figura 2.4). Os picos de absorção ocorrem no azul e no vermelho. Fritschi e Ray (2007) apresentaram uma avaliação da relação entre o nitrogênio, concentração das clorofilas e da razão entre a clorofila *a* e *b*, considerando 833 ascensões de soja. Em seus resultados, apresentaram a concentração de *Cab*. Em geral, os valores variaram de 20 a 40 $\mu g. cm^{-2}$. Num experimento conduzido em uma casa de vegetação por Ferri (2002) e Ferri et al. (2001; 2004) com uma variedade precoce de soja (IAC 17), os autores mostraram que a concentração da clorofila total foi máxima entre o estágio vegetativo V5 (22,50 $\mu g. cm^{-2}$) e o estágio reprodutivo R5 (14,10 $\mu g. cm^{-2}$).

Tabela 2.3 – Parâmetros de entrada do modelo de transferência radiativa PROSAIL.

Abreviação	Parâmetro	Unidade	Valor padrão	Nível
<i>Cab</i>	Conteúdo de clorofila <i>a</i> e <i>b</i>	$\mu\text{g.cm}^{-2}$	30	Folha
<i>Car</i>	Conteúdo de carotenoides	$\mu\text{g.cm}^{-2}$	10	Folha
<i>Cbrown</i>	Conteúdo de pigmentos marrons	-	0,0	Folha
<i>Cw</i>	Espessura equivalente de água	cm	0,015	Folha
<i>Cm</i>	Conteúdo de matéria seca	g.cm^{-2}	0,009	Folha
<i>N</i>	Parâmetro estrutural da folha	-	1,2	Folha
<i>IAF</i>	Índice de Área Foliar	-	2	Dossel
<i>DAF</i>	Distribuição Angular das Folhas média	Graus (°)	50	Dossel
<i>psoil</i>	Coeficiente de reflectância do solo	-	1	Dossel
<i>skyl</i>	Razão radiação difusa/direta	%	70	-
<i>hspot</i>	Parâmetro hot spot	-	0,2	-
<i>ihot</i>	Parâmetro de transmissão do hspot	-	1	-
<i>AZS</i>	Ângulo Zenital Solar	Graus (°)	30	-
<i>AZV</i>	Ângulo Zenital de Visada	Graus (°)	0	-
<i>AAR</i>	Ângulo Azimutal Relativo	Graus (°)	0	-

Fonte: Dados extraídos e adaptados de Jacquemoud et al. (2009) e do algoritmo.

Enquanto as clorofilas são um indicativo do estresse e do estágio fisiológico, os carotenoides refletem o status fisiológico da planta (BLACKBURN, 2006). O conteúdo de carotenoides afeta principalmente a reflectância na faixa do azul e passa a ser mais notável à medida que a planta atinge estádios de senescência (REDDY et al., 2001). A adubação com magnésio pode aumentar a concentração de carotenóides na soja e alterar a reflectância (NASCIMENTO et al., 2009). Devido à pequena disponibilidade de valores medidos do coeficiente de absorção específico dos carotenoides, os parâmetros utilizados para modelar o efeito desse pigmento no PROSAIL são apresentados na Figura 2.5. Considerando a faixa espectral do visível, o efeito dos carotenóides é máxima na faixa do azul e diminui conforme aumenta o comprimento de onda.

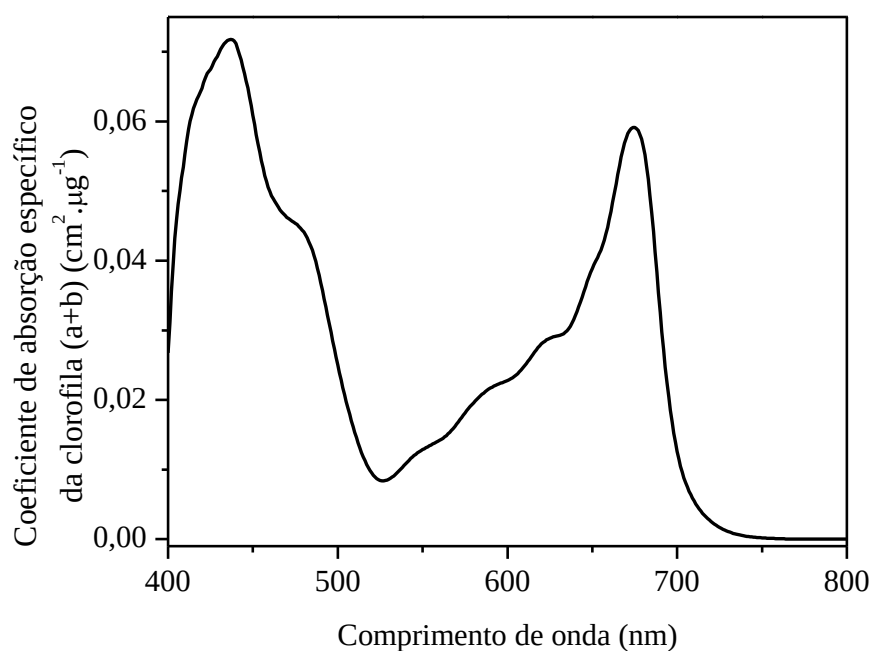


Figura 2.4 - Coeficientes de absorção específicos das clorofilas *a* e *b* utilizados no modelo PROSAIL.

Fonte: Adaptado de Féret et al. (2008).

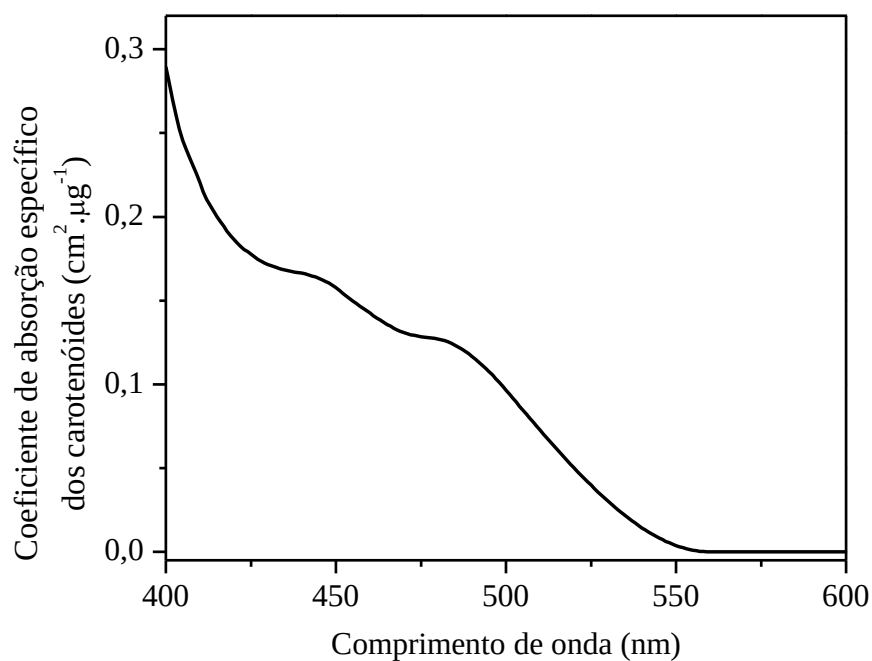


Figura 2.5 – Coeficientes de absorção específicos dos carotenóides utilizados no modelo PROSAIL.

Fonte: Adaptado de Féret et al. (2008).

Os dados de pigmentos marrons utilizados no PROSAIL são tabelados (Frederic Baret;

(EMMAH, INRA Avignon, <baret@avignon.inra.fr>). No PROSAIL, esses dados são utilizados para modelar o coeficiente de absorção dos pigmentos marrons, conforme apresentado na Figura 2.6. O efeito é mais acentuado da faixa do azul e diminui em direção ao infravermelho próximo. De acordo com Scholfield e Dutton (1954), os pigmentos marrons tendem a escurecer as folhas à medida que a temperatura aumenta.

Os parâmetros utilizados pelo PROSAIL para modelar a absorção da radiação pela água são apresentados na Figura 2.7. O efeito do conteúdo de água é verificado nas bandas de absorção do SWIR, com destaque para as faixas de 1400 nm, 1950 nm e 2500 nm, onde a absorção é máxima.

O conteúdo de absorção da matéria seca sobre a reflectância é modelado de acordo com os coeficientes apresentados na Figura 2.8. Esse parâmetro afeta especialmente a banda do azul (absorção próxima de 80%) e do SWIR. No SWIR é verificado um aumento gradual da absorção de 1400 nm (5%) a 2500 nm (40%).

A influência do solo pode ser modelada no PROSAIL. Para isso, deve ser incluído um espectro de reflectância típico da área de estudo.

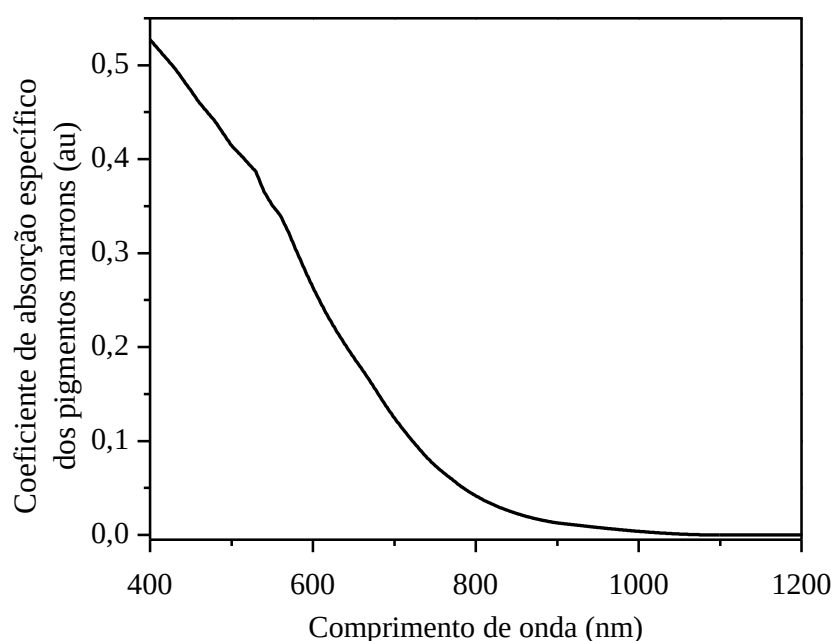


Figura 2.6 - Coeficientes de absorção específico dos pigmentos marrons utilizados no modelo PROSAIL. (au) = unidades arbitrárias.

Fonte: Adaptado de Féret et al. (2008).

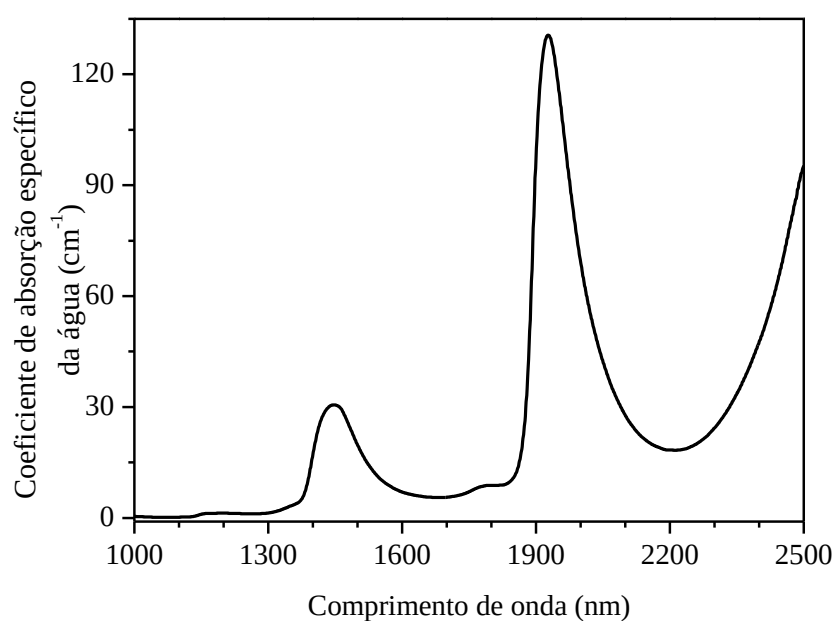


Figura 2.7 - Coeficientes de absorção específicos da água utilizados no modelo PROSAIL.

Fonte: Adaptado de Féret et al. (2008).

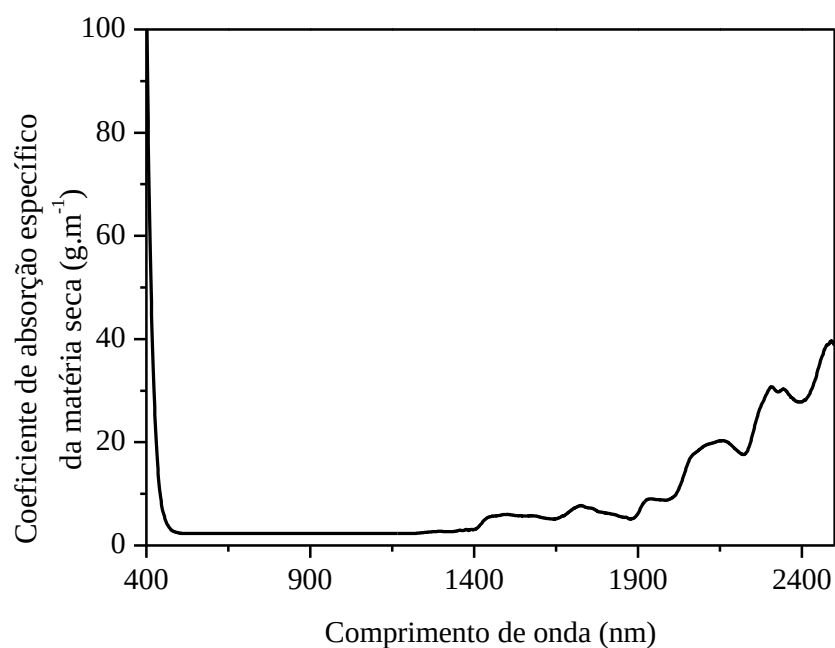


Figura 2.8 - Coeficiente de absorção específico do conteúdo de matéria seca utilizado no modelo PROSAIL.

Fonte: Adaptado de Féret et al. (2008).

A distribuição angular de folhas (DAF) para uma mesma espécie basicamente é dependente das diferenças específicas entre cultivares associadas à ontogenia e

mudanças adaptativas da planta (ROSS, 1981). No PROSAIL, estss parâmetros são modelados assumindo um valor médio para a DAF, de acordo com as características do dossel (planófilo, erectófilo, etc.). Outro parâmetro do dossel que o usuário define refere-se ao Índice de Área Foliar (IAF). O valor pode ser fixado ou alterado dinamicamente, de acordo com os objetivos do usuário. Detalhes sobre o IAF e a DAF são discutidos na seção 2.2

Os parâmetros da geometria de iluminação e de visada são discutidos na seção 2.4.2. Cabe destacar que o ângulo azimutal relativo (AAR) é obtido pela Equação 2.3, onde AAV (ϕ_o) refere-se ao ângulo azimutal de visada e AAS (ϕ_i) ao ângulo azimutal solar (Figura 2.2). No PROSAIL, o AAR pode variar de -180° a 180° . O sinal negativo é apenas um artifício computacional utilizado para representar o lado do plano principal de espalhamento. No total o AAR soma 360° , sendo 180° para lado (esquerda e direita do plano principal de espalhamento). O ângulo $AAR=0^\circ$ refere-se à posição abaixo do Sol (fonte de iluminação), na direção do retroespalhamento considerando o plano principal de espalhamento.

$$AAR = AAV - 180 - AAS \quad 2.3$$

2.7 Métodos estatísticos

2.7.1 Wilcoxon Signed Rank Test (WSRT)

O teste não-paramétrico de Wilcoxon foi proposto como uma alternativa ao teste t de Student para avaliar a igualdade de médias de conjuntos de amostras que não satisfazem a distribuição normal (WILCOXON, 1945). A hipótese nula ($H_0 = 0$) é a de que não existem diferenças significativas em ambas as direções (positivas e negativas) entre as médias dos grupos (os valores W e z seriam iguais a zero caso as médias fossem totalmente iguais). Consequentemente, a hipótese alternativa ($H_1 \neq 0$) indica que as médias são estatisticamente diferentes (WILCOXON, 1945; LOWRY, 2009). Para cada valor z calculado, é possível determinar a probabilidade de as médias entre os dois grupos serem iguais (valor p), através de aproximações com a distribuição normal

(ORIGINLAB CORPORATON, 2007; SIGMAPLOT, 2009). Detalhes sobre o cálculo do índice W (Equação 2.4), valores z e p podem ser encontrados em Wilcoxon (1945) e Lowry (2009), que ainda apresentam exemplos de aplicações.

$$W = \sum_{i=1}^n \varphi_i R_i \quad 2.4$$

W é o valor do teste WSRT; φ representa valores de z positivos e R_i indica o ranking para cada valor ordenado.

2.7.2 Técnica de reamostragem Bootstrap

O tamanho das amostras frequentemente é limitado por questões financeiras, de tempo, físicas, etc. Assim, ao trabalhar com amostras pequenas, a validação de correlações, estimativas, inferências, etc. é prejudicada e/ou limitada pelo tamanho da amostra. Para conferir maior robustez aos resultados calculados a partir de um pequeno conjunto de amostras, algumas técnicas de reamostragem foram desenvolvidas. O método de Bootstrap é bastante conhecido por permitir avaliar os efeitos amostrais (número e conjuntos) e reduzir os efeitos de amostras não representativas em um conjunto finito de amostras. O método consiste em realizar n sorteios aleatórios para selecionar um determinado número de amostras (dentro do conjunto amostral original) e recalcular os parâmetros estatísticos n vezes (normalmente representado pelo número de iterações, p.ex. 1000, 10000) (EFRON, 1982; HESTERBERG et al., 2008; SIGMAPLOT, 2009). Uma edição da revista “*Statistical Science*” (v.18, n.2, 2003) apresenta detalhadamente teorias e aplicações dos métodos de reamostragem, especialmente bootstrap.

3 METODOLOGIA

O fluxograma apresentado na Figura 3.1 ilustra as principais etapas do desenvolvimento da pesquisa. Cada etapa será discutida numa seção cuja numeração é apresentada na figura supracitada. Em síntese, a seção 3.1 refere-se aos procedimentos iniciais de escolha e caracterização da área de estudo e a seção 3.2 às atividades de aquisição, pré-processamento e ajuste dos dados agrônômicos e imagens. As quatro seções seguintes (3.3; 3.4; 3.5 e 3.6) estão relacionadas ao fluxo de geração dos resultados.

Fluxo geral do desenvolvimento da Metodologia

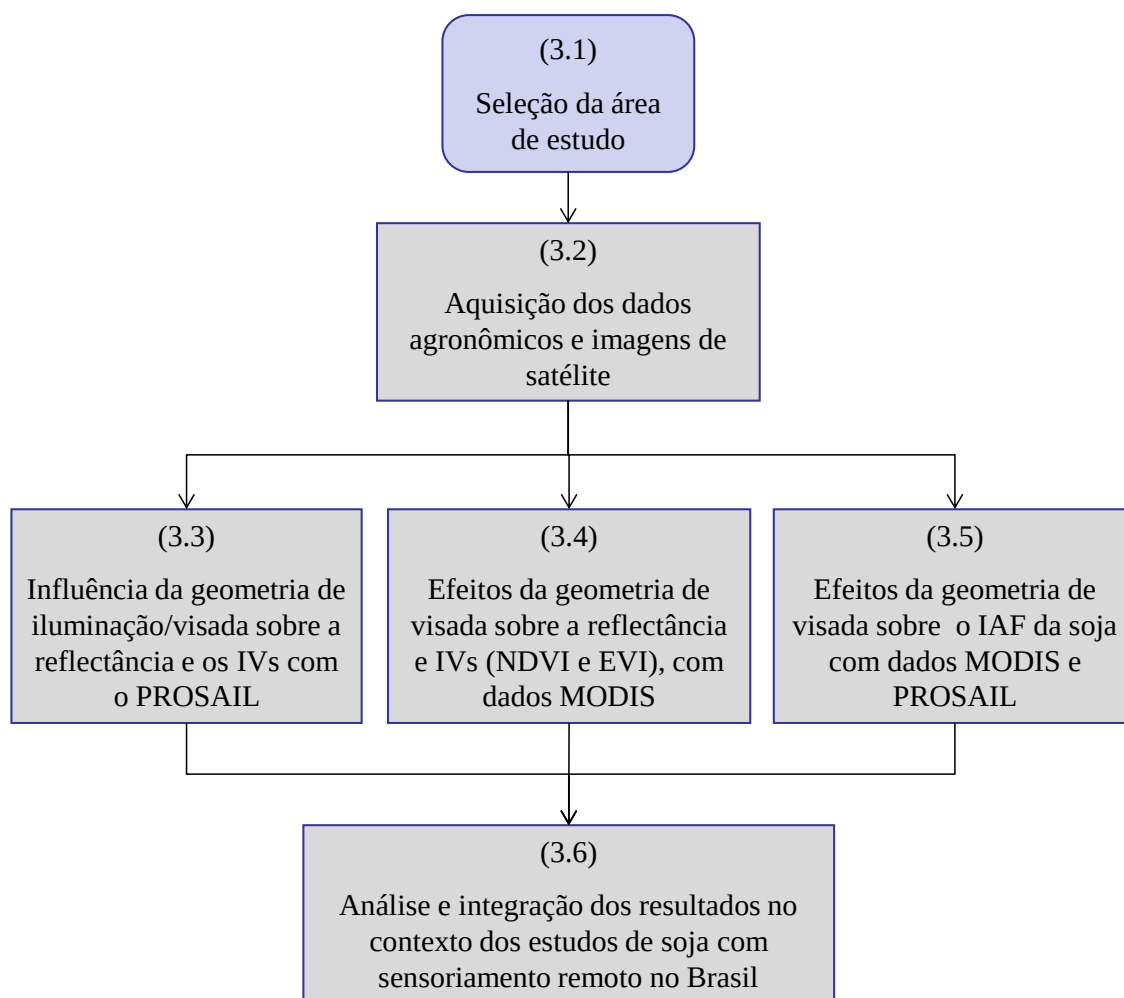


Figura 3.1 - Fluxograma de atividades desenvolvidas durante a pesquisa.

A partir deste ponto, o FRB será chamado de reflectância.

3.1 Área de estudo – visão geral

A área de estudo compreende quatro fazendas localizadas no município de Querência, a nordeste do Estado do Mato Grosso (Figura 3.2), caracterizadas pelo cultivo intensivo de soja. A área está localizada em uma região de transição do clima tropical chuvoso equatorial (Af – Köppen) para o tropical de savana (Aw), com domínio biogeográfico natural de florestas. A média anual de precipitação está entre 1800 e 2100 mm, com temperatura média de 25° C (Instituto Nacional de Meteorologia, INMET, 2008), com duas estações bem definidas: chuvosa entre setembro e abril e seca entre maio e agosto. A área de estudo foi selecionada pela disponibilidade de imagens Hyperion e MODIS com visada fora do nadir em dois anos-safra (2004-2005 e 2005-2006) e pela disponibilidade de dados agronômicos.

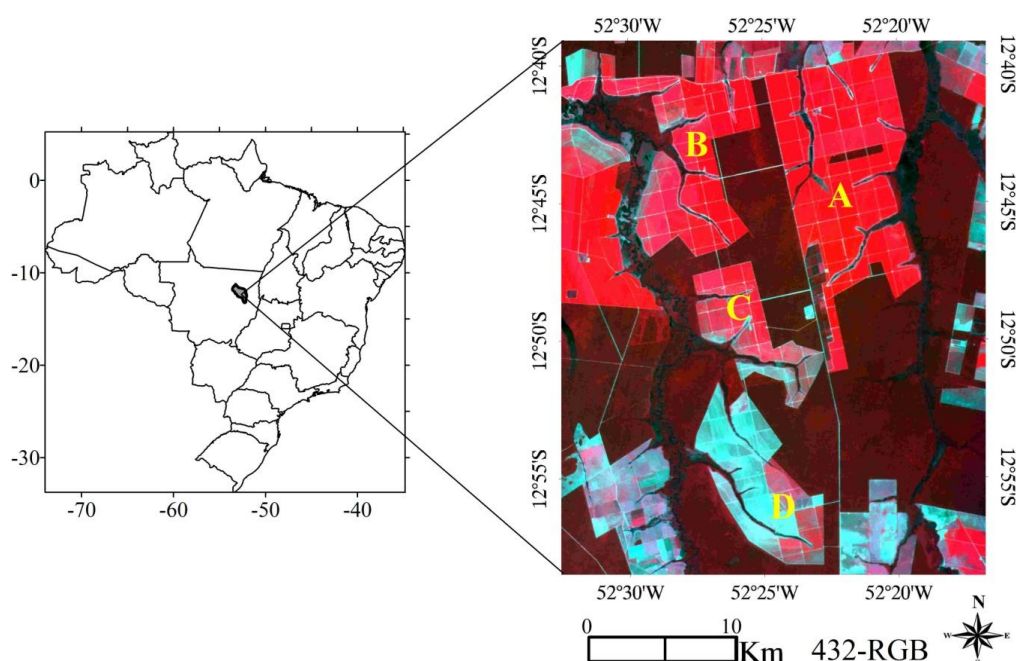


Figura 3.2 – Localização da área de estudo no município de Querência no Estado do Mato Grosso (MT) e identificação das quatro fazendas estudadas (A – Tanguro; B – Alvorada; C – Anta; D - Mutum). A composição colorida foi obtida com imagens adquiridas pelo sensor sino-brasileiro CCD/CBERS-2 (bandas 4, 3 e 2 em RGB) de 21/01/2006.

Originalmente, no município de Querência, a cobertura vegetal era composta de 15% de cerrados, 70% de matas de transição e 10% de florestas tropicais que fazem parte da Amazônia legal, e 5% de várzeas (CORRÊA, 2002).

O principal solo da região é o LATOSSOLOS VERMELHO-AMARELOS Distróficos (classificação baseada no Sistema Brasileiro de Classificação de Solos, de 2006), com horizonte B moderadamente espesso e teores médios de matéria orgânica, que ocorre em associação com NEOSSOLOS QUARTZARÊNICOS e LATOSSOLOS VERMELHO-ESCURO distróficos e álicos. Em geral, esses solos apresentam baixa fertilidade natural e altos teores de alumínio (CORRÊA, 2002). O relevo da região é suavemente ondulado a plano. A área de estudo está localizada a uma altitude média de 348 m (± 21 m) (Jet Propulsion Laboratory, JPL, 2009).

No Estado do Mato Grosso, a expansão da fronteira agrícola desde a década de 1970 reflete o aumento da área cultivada de soja, incentivado por políticas públicas e facilidades de acesso à terra (LIMA; MAY, 2009; ARVOR et al., 2009; VALBUENA, 2009). Com a adaptação de cultivares as condições climáticas da região, a soja pôde expandir-se e atingir altos níveis de produtividade (> 3000 kg/ha) (CONAB, 2009).

3.2 Aquisição dos dados agronômicos e das imagens de satélite

3.2.1 Aquisição dos dados agronômicos

Informações georreferenciadas sobre as diferentes variedades de soja nos dois anos-safra (2004-2005 e 2005-2006) e sobre os dados de produtividade de grãos por talhão foram fornecidas pelo Grupo André Maggi, proprietário das quatro fazendas correspondentes à área de estudo. Uma síntese dos dados para os anos-safra 2004-2005 e 2005-2006 é apresentada na Tabela 3.1 e na Tabela 3.2, respectivamente.

Além dessas, outras informações como as datas de plantio e de colheita da soja, os espaçamentos entre as linhas de plantio (45 cm) e áreas dos talhões foram disponibilizadas pelo Grupo André Maggi. Essas informações serviram de referência para elaborar e validar os resultados obtidos com as estimativas de IAF da soja elaboradas através de modelos empíricos e para validar os resultados do teste dos classificadores para discriminar variedades de soja em um estudo concomitante ao da Tese (Apêndice A).

Tabela 3.1 - Parâmetros agronômicos da soja para o ano-safra 2004-2005.

Fazenda	Variedade de soja	Período de Plantio	Período de colheita	Ciclo local (dias)	Área (ha)	Prod. (kg/ha)
Tanguro	Perdiz	30/10 a 9/11	7/3 a 9/4	147	4605,20	2387
Tanguro	Monsoy 9010	14/11 a 18/11	24/3 a 14/4	139	2218,50	3201
Tanguro	Tabarana	9/11 a 15/11	29/3 a 10/4	144	1656,90	3095
Tanguro	Monsoy 8411	29/10 a 2/11	20/2 a 13/3	120	562,10	3960
Tanguro	Kaiabi	8/11 a 11/11	30/3 a 10/4	146	1421,80	2784
Tanguro	Uirapuru	17/11 a 18/11	12/4 a 14/4	146	237,00	3472
Alvorada	Monsoy 9010	17/11 a 18/11	5/4 a 10/4	140	127,50	2694
Alvorada	Uirapuru	17/11 a 24/11	3/4 a 12/4	138	2643,70	2788
Alvorada	Pioneer DM-339	4/12 a 7/12	5/4 a 28/4	131	243,10	2074
Alvorada	Pioneer DM-309	1/12 a 7/12	5/3 a 29/4	134	1436,80	2132
Alvorada	Monsoy 8914	5/12 a 8/12	9/4 a 27/4	132	1231,50	1879
Anta	Monsoy 8914	6/12 a 15/12	11/4 a 22/4	126	2630,50	2214
Anta	Kaiabi 2	13/12 a 19/12	18/4 a 19/4	124	324,80	2948
Anta	Arara Azul	14/12 a 19/12	18/4 a 21/4	124	187,00	2715
Anta	Engopa 313	30/12	20/4 a 22/4	112	23,20	3377
Mutum	Engopa 313	30/12 a 8/1	22/4 a 28/4	111	2749,20	2045
Mutum	Arara Azul	15/12 a 27/12	19/4 a 26/4	123	1311,10	2084

Tabela 3.2 - Parâmetros agronômicos da soja para o ano-safra 2005-2006.

Fazenda	Variedade de soja	Período de Plantio	Período de colheita	Ciclo local (dias)	Área (ha)	Prod. (kg/ha)
Tanguro	Monsoy 8914	4/11 a 9/11	6/3 a 24/3	129	3200,80	3625
Tanguro	Monsoy 8866	4/11 a 6/11	14/3 a 26/3	135	521,10	3952
Tanguro	Perdiz	25/10 a 5/11	1/3 a 28/3	134	2270,70	3299
Tanguro	Tabarana	8/11 a 22/11	20/3 a 9/4	135	4988,90	3911
Tanguro	Monsoy 9010	11/11 a 17/11	20/3 a 9/4	136	1564,00	3685
Tanguro	Jataí	11/11 a 26/11	23/3 a 13/4	134	414,00	3812
Tanguro	Uirapuru	11/11 a 12/11	23/3 a 26/3	133	188,00	3248
Alvorada	Jataí	22/11 a 1/12	27/3 a 13/4	128	1341,50	4015
Alvorada	Monsoy 9010	22/11 a 1/12	28/3 a 15/4	129	2965,50	3277
Alvorada	Tabarana	18/11 a 25/11	25/3 a 10/4	133	1307,50	3642
Anta	Jataí	2/12 a 4/12	8/4 a 12/4	126	682,60	3809
Anta	Monsoy 9010	7/12 a 9/12	10/4 a 14/4	125	190,80	3499
Anta	Monsoy 9350	8/12 a 18/12	11/4 a 19/4	122	530,50	3367
Anta	Uirapuru	5/12 a 14/12	10/4 a 17/4	125	1449,10	3460
Anta	Engopa 313	14/12 a 15/12	17 April	123	253,60	3712
Mutum	Uirapuru	6/12 a 23/12	17/4 a 26/4	127	762,50	3233
Mutum	Engopa 313	13/12 a 23/12	16/4 a 26/4	124	2583,10	3405
Mutum	Jataí	4/12 a 11/12	4/4 a 6/4	118	579,70	3651
Mutum	Monsoy 9350	18/12 a 20/12	25/4 a 26/4	128	103,70	3430

Com base na data média do plantio de cada variedade (em cada fazenda) e no modelo de crescimento apresentado por *Ontario Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs* (OMAFRA, 2001) foram estimados os estádios reprodutivos da soja.

3.2.2 Imagens de satélite

Foram utilizadas imagens MODIS (subprodutos) e imagens Hyperion/EO1. Todos os dados MODIS foram obtidos da Coleção 5 (ou da versão mais recente).

3.2.2.1 Produtos MODIS

Os produtos MODIS foram obtidos do repositório de imagens do “*Warehouse Inventory Search Tool* (WIST)” (disponível no endereço: < <https://wist.echo.nasa.gov/wist-bin/api/ims.cgi?mode=MAINSRCH&JS=1> >) e pré-processados com o aplicativo *MODIS Reprojection Tools* (MRT®) (DWYER; SCHMIDT, 2006; Land Processes Distributed Active Archive Center, LPDAAC, 2008) para a obtenção de coordenadas planas e a realização da reamostragem dos pixels. O método de reamostragem utilizado foi o vizinho mais próximo. A análise dos dados foi executada com auxílio de ferramentas de análise espectral implementadas no aplicativo ENVI® (ITT, 2008) e extensões desenvolvidas na linguagem *Interactive Data Language* - IDL (ITT, 2008).

Um banco de imagens adquiridas pelos sensores MODIS/Terra foi montado para os dois anos-safra da soja abrangendo toda a área de estudo. As resoluções espaciais de 250, 500 e 1000 metros foram adotadas de acordo com as características de cada produto disponibilizado e em relação à análise de dados que foi desenvolvida. Todos os produtos MODIS foram obtidos em formato *Hierarchical Data Format* (HDF) e com a devida correção geométrica aplicada.

Entre os produtos MODIS utilizados citam-se:

Imagens de reflectância de superfície

- MODIS/Terra Surface Reflectance Daily L2G Global 1km and 500m SIN Grid V005 (MOD09GA5);
- MODIS/Terra Surface Reflectance 8-Day L3 Global 500m SIN Grid

V005 (MOD09A15);

- MODIS/Terra Surface Reflectance 8-Day L3 Global 250m SIN Grid V005 (MOD09Q15);
- MODIS/Terra Surface Reflectance Daily L2G Global 250m SIN Grid V005 (MOD09GQ5);

Índice de área foliar (IAF) e Fração absorvida da radiação fotossinteticamente ativa (FAPAR)

- MODIS/Terra Leaf Area Index/FPAR 8-Day L4 Global 1km SIN Grid V005 (MOD15A25);

Classificação do uso/cobertura da terra (Land cover)

- MOD12Q1 – Land Cover Type Yearly L3 Global 500 m;

Índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) e Índice de vegetação melhorado (EVI)

- MODIS/Terra Vegetation Indices 16-Day L3 Global 250m (MOD13Q1);
- MODIS/Terra Vegetation Indices 16-Day L3 Global 500m (MOD13A1);

As imagens de reflectância de superfície foram fornecidas com as devidas correções atmosféricas associadas ao espalhamento e à absorção de aerossóis e gases. Essas correções são baseadas no modelo de transferência radiativa 6S (*Second Simulation of a Satellite Signal in the Solar Spectral vector code*, v.1.1) (VERMOTE; VERMEULEN, 1999; KOTCHENOVA et al., 2006). Essas correções são aplicadas às bandas do VNIR (459-479; 545-565; 620-670; 841-876 nm) e SWIR (1230-1250; 1628-1652; 2105-2155 nm). Detalhes sobre os processamentos associados aos produtos de reflectância de superfície podem ser encontrados em *Land Surface Reflectance Science Computing Facility* (LSRSCF, 2008).

Os dados dos índices de vegetação (NDVI e EVI) do sensor MODIS são derivados da reflectância de superfície, assim como o índice de área foliar (IAF) e a fração absorvida da radiação fotossinteticamente ativa (FAPAR), cujos detalhes dos algoritmos podem

ser encontrados em Huete et al. (1999) (NDVI e EVI) e Knyazikhin et al. (1998a,b) (IAF e fAPAR), respectivamente.

As imagens de reflectância de superfície diárias e as composições de 8 e 16 dias foram adquiridas para os períodos de 01/10/2004 a 15/04/2005 e de 01/10/2005 a 15/04/2006, de acordo com as datas de plantio e colheita da soja para avaliar sua dinâmica espectro-temporal e estudar a qualidade dos produtos.

As informações angulares (AZV, AZS e AAR) foram extraídas dos produtos MOD09GA5 (MODIS Terra), considerando o centro geográfico do grupo de fazendas (estimou-se que as variações dentro das fazendas foram irrelevantes, de forma que um único ângulo médio para todos os pixels pôde ser adotado).

3.2.2.2 Imagens Hiperespectrais Hyperion/EO-1

Duas imagens Hyperion foram utilizadas: uma obtida em fevereiro de 2005 na direção do espalhamento frontal e outra obtida em janeiro de 2006 na direção do retroespalhamento. Ambas foram obtidas com ângulos de visada fora do nadir ($\pm 23^\circ$) em 242 bandas espectrais (196 radiometricamente calibradas) na faixa de 400 a 2400 nm com 30 metros de resolução espacial. Essas imagens foram adquiridas do *United States Geological Survey* (USGS) (< <http://edcns17.cr.usgs.gov/EarthExplorer/> >) no nível de processamento “Level 1Gst”.

O pré-processamento dos dados Hyperion envolveu: (a) o uso de um algoritmo para minimizar os efeitos de *striping* da imagem (GOODENOUGH et al., 2003); (b) o uso subsequente do *Fast Line-of-Sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes* (FLAASH) com a banda posicionada em 1140 nm para o cálculo do vapor d’água pixel-a-pixel e correção atmosférica subsequente de outros gases; (c) a utilização da técnica *Minimum Noise Fraction* (MNF) sobre intervalos espectrais específicos para a suavização do ruído e remoção de artefatos decorrentes da correção atmosférica, seguindo procedimentos descritos por Galvão et al. (2005). O passo final foi a correção geométrica das imagens usando dados ortorretificados do Geocover (ETM+/Landsat 7).

A correção atmosférica das imagens Hyperion com o FLAASH foi baseada em um modelo de atmosfera tropical, com modelo de aerossol rural e uma estimativa de visibilidade de 50 km.

3.2.3 Dados de Precipitação

Para auxiliar a compreensão das variações espectrais associadas à soja foram utilizados dados de uma estação meteorológica localizada na sede da Fazenda Tanguro e do satélite *Tropical Rainfall Measuring Mission* (TRMM). Os dados estimados (a cada 3 horas) pelo TRMM foram obtidos no nível “3B42” e processados com auxílio de um algoritmo desenvolvido em IDL® (Interactive Data Language, ITT, 2008) e GrADS (Grid Analysis and Display System, COLA, 2009). Esses dados foram analisados em termos de precipitação acumulada, considerando uma área de 20 km². Detalhes sobre a validação das estimativas de precipitação do TRMM em relação às estações meteorológicas da Agência Nacional de Águas (ANA) são apresentados por Franchito et al. (2009). Em síntese, os resultados mostraram uma boa concordância entre as medidas por estações de campo e as estimativas do TRMM.

3.3 Avaliação da influência da geometria de iluminação e de visada sobre a reflectância e os índices de vegetação com simulações no PROSAIL

Todas as etapas da modelagem desenvolvida no PROSAIL são apresentadas na Figura 3.3. O algoritmo em linguagem Matlab® (THE MATHWORKS, 2007) do modelo de transferência radiativa PROSAIL (JACQUEMOUD et al., 2006; JACQUEMOUD et al., 2009) foi ajustado para manter alguns parâmetros das folhas e do dossel constantes ao longo da modelagem e outros parâmetros oscilando dinamicamente (diversas combinações).

Para fazer o ajuste dos parâmetros bioquímicos e biofísicos da soja, foram utilizados dados da literatura e testes preliminares. Assim, alguns parâmetros do PROSAIL foram mantidos constantes: Concentração de clorofila a e b (*Cab*); Conteúdo de carotenoides (*Car*); pigmentos marrons (*Cbrown*); Espessura equivalente de água (*Cw*); conteúdo de matéria seca (*Cm*); coeficiente estrutural da folha (*N*); Distribuição angular das folhas

(angl); coeficiente de reflectância do solo (psoil); razão entre radiação difusa e direta; hot spot (hspot); parâmetros de transmitância do hot spot (ihot). Por outro lado, foram avaliadas combinações dinâmicas entre o índice de área foliar (IAF); ângulo zenital solar (AZS); ângulo zenital de visada (AZV) e o azimute relativo entre a geometria de iluminação e de visada (AAR).

3.3.1 Ajuste dos parâmetros bioquímicos e biofísicos fixos (constantes) no processo de modelagem.

Uma síntese dos parâmetros constantes utilizados nas simulações é apresentada na Tabela 3.3. Estes valores foram definidos com base na literatura e com base em testes preliminares feitos para avaliar o impacto e a magnitude dos efeitos de cada parâmetro. Assim, foi possível estabelecer um valor de referência e avaliar o conjunto de parâmetros dinâmicos associados ao IAF e a geometria de iluminação e visada.

A concentração de *Cab* das folhas de soja foi ajustada para o valor de $40 \mu g. cm^{-2}$ com base no estudo de Fritsch e Ray (2007) e Wang et al. (2011). Enquanto as clorofilas são um indicativo do estresse e do estágio fisiológico, os carotenoides refletem o status fisiológico da planta (BLACKBURN, 2006). Devido à indisponibilidade de dados do conteúdo de carotenoides nas folhas de soja para comparação e em função de testes preliminares feitos, foi utilizado o valor $13 \mu g. cm^{-2}$ para este parâmetro. Este valor é um pouco acima do padrão do modelo PROSAIL, proposto por Féret et al. (2008) com base em medidas feitas em laboratório por quatro grupos de pesquisa distintos com diferentes espécies, condições ambientais (clima temperado, mediterrâneo, tropical úmido) e estádios de desenvolvimento (LOPEX-1993; CALMIT-1996; ANGERS-2003; HAWAII-2007).

Devido à ausência de dados da concentração de pigmentos marrons para folhas de soja e a testes preliminares, o valor foi mantido fixo em 0,3 unidades arbitrárias (ua). Os coeficientes de absorção dos pigmentos marrons utilizados no PROSAIL são tabelados (Frederic Baret; EMMAH, INRA Avignon, <baret@avignon.inra.fr>). Alguns valores foram testados: 0,0; 0,1; 0,2; 0,3; 0,4 e 0,5; 1; 2; 3; 4; 5; 10 ua. Durante os testes, para todos os valores mencionados, os demais parâmetros foram mantidos constantes.

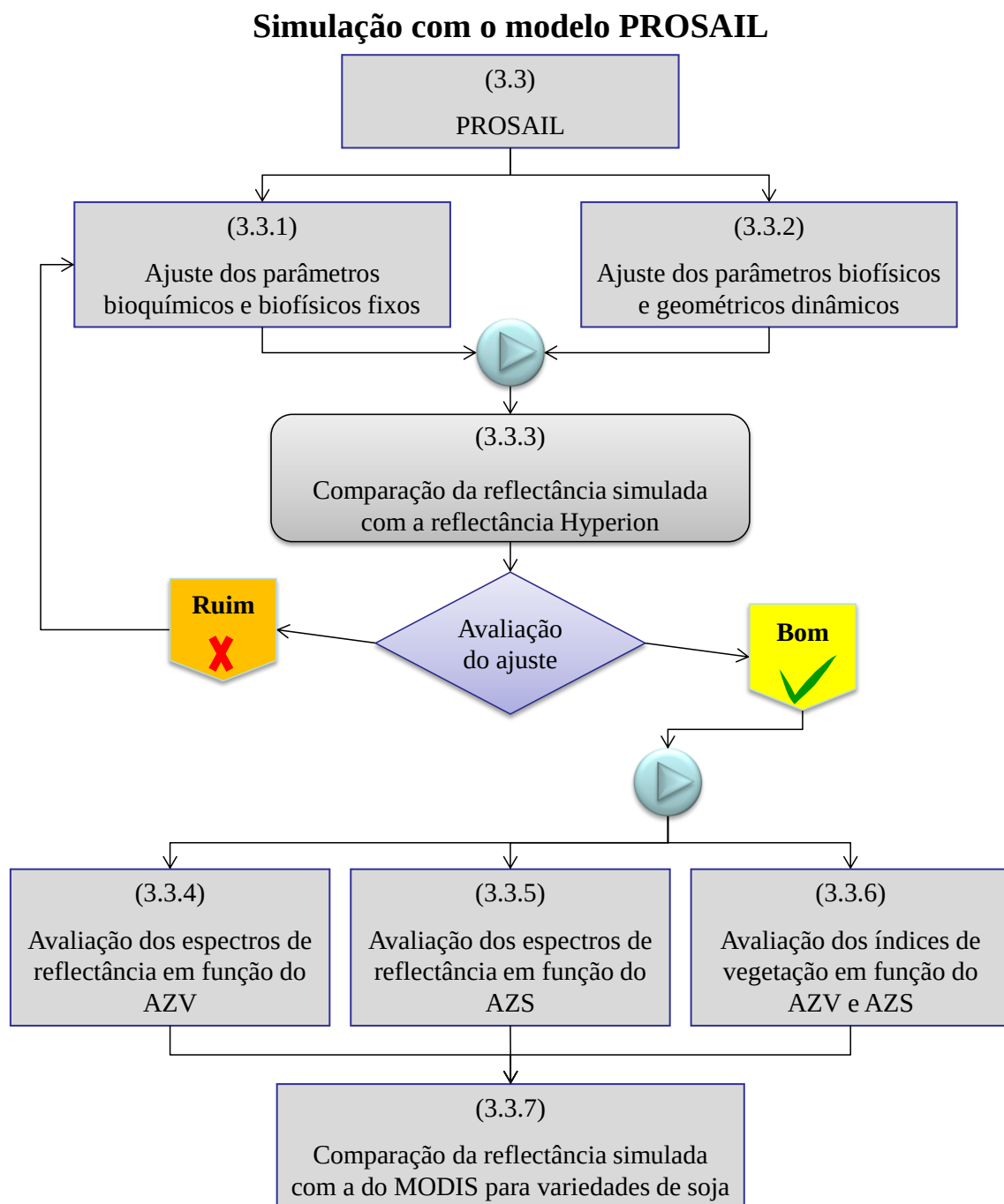


Figura 3.3 – Fluxograma das etapas da simulação com o PROSAIL para avaliação dos efeitos da geometria de iluminação e de visada sobre dosséis de soja.

Os valores dos parâmetros espessura equivalente de água (C_w) e conteúdo de matéria seca (C_m) foram ajustados a partir de testes preliminares. O parâmetro estrutural N está associado ao arranjo estrutural interno das folhas. Assim, para plantas monocotiledôneas, N pode variar de 1 a 1,5; para dicotiledôneas o N varia de 1,5 a 2,5 e

para vegetação senescente é superior a 2,5 (JACQUEMOUD, 1993). Como a soja é uma planta dicotiledônea, foi utilizado o valor de 1,5.

Tabela 3.3 – Parâmetros biofísicos e bioquímicos constantes utilizados nas simulações com o PROSAIL.

Abreviação	Parâmetro	Unidade	Valor utilizado	status
<i>Cab</i>	Conteúdo de clorofila <i>a</i> e <i>b</i>	$\mu\text{g.cm}^{-2}$	40	Constante
<i>Car</i>	Conteúdo de carotenoides	$\mu\text{g.cm}^{-2}$	13	Constante
<i>Cbrown</i>	Conteúdo de pigmentos marrons	-	0,3	Constante
<i>Cw</i>	Espessura equivalente de água	cm	0,02	Constante
<i>Cm</i>	Conteúdo de matéria seca	g.cm^{-2}	0,009	Constante
<i>N</i>	Parâmetro estrutural da folha	-	1,5	Constante
<i>DAF</i>	Distribuição Angular das Folhas média	Graus (°)	13	Constante
<i>psoil</i>	Coeficiente de reflectância do solo	-	1	Constante
<i>skyl</i>	Razão radiação difusa/direta	%	20	Constante
<i>hspot</i>	Parâmetro hot spot	-	0,2	Constante
<i>ihot</i>	Parâmetro de transmissão do hspot	-	1	Constante

O valor da DAF foi ajustado de acordo com informações contidas no WinSAIL (Agricultural Research Service, ARS, 2006) e ajustados para o PROSAIL. O valor de 13° é equivalente a um dossel planófilo, típico da soja. Alguns testes foram feitos com outros valores e os resultados foram brevemente discutidos.

Para representar o solo da região, foi utilizado um espectro de reflectância do solo obtido pelo sensor *Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer* (AVIRIS) de um LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO seco, típico na região em estudo. O espectro original foi filtrado para a região do infravermelho médio (2250 a 2500 nm) com um filtro de média (5) devido à presença de ruído nessa faixa do espectro eletromagnético. Assim, para incluir o efeito do substrato nas simulações, o valor 1 foi adotado no modelo, representando a inclusão do efeito do substrato nas distintas simulações.

O parâmetro de hot spot (*hspot*) foi ajustado a partir de testes com distintos valores, sendo que o valor de 0,2 foi utilizado por melhor representar uma situação real. Em geral, quanto mais baixo o valor, mais agudo tende a ser o ponto de hot spot no espectro simulado. Quanto mais alto o valor, mais espalhado (para ângulos fora do pico do hot spot) tende a ser o efeito do hot spot. O parâmetro *ihot* foi ajustado para 1, o que

significa a inclusão do efeito hotspot nas simulações e nos espectros de reflectância gerados (CASA, 2003).

3.3.2 Ajuste dos parâmetros biofísicos e geométricos dinâmicos

Os parâmetros apresentados na Tabela 3.4 referem-se a valores que foram alterados para avaliar a influência de cada condição de iluminação e visada para distintos valores de IAF. Assim, para avaliar o efeito da geometria de iluminação e visada sobre o IAF, o IAF foi fixado em um determinado valor e todas as simulações com distintos valores de AZS, AZV e AAR foram feitas (todas as combinações entre os ângulos). O mesmo foi feito para cada um dos intervalos (passo) das variáveis dinâmicas. Desta forma, foi gerada uma figura e uma planilha (ASCII) para cada condição de IAF e geometria de iluminação e visada. Como as maiores variações da reflectância em função do IAF ocorrem nos estádios iniciais ($IAF < 1$), os intervalos de passo foram adaptados para representar melhor as variações da reflectância entre um IAF de zero e um.

Tabela 3.4 – Parâmetros biofísicos e geométricos (iluminação e visada) dinâmicos utilizados como entrada no PROSAIL.

Abreviação	Parâmetro	Unidade	Valores Mínimo - Máximo	Passo
IAF	Índice de Área Foliar	-	0,2 a 1 1 a 7	0,2 1
AZS	Ângulo Zenital Solar	Graus (°)	-70 a 70	5°
AZV	Ângulo Zenital de Visada	Graus (°)	-70 a 70	5°
AAR	Ângulo Azimutal Relativo	Graus (°)	-180 a 180	5°

Após realizar todas as combinações, os dados foram agrupados e representados por gráficos e figuras, considerando cada variável dinâmica individualmente em função dos demais parâmetros. O conjunto de simulações (combinando distintos parâmetros) foi feito através de um algoritmo implementado no Matlab[®] (THE MATHWORKS, 2007).

3.3.3 Comparação da reflectância simulada com a reflectância Hyperion

Para avaliar a qualidade das simulações feitas no PROSAIL, foi feita uma comparação (em caráter de validação) com um espectro de reflectância médio da variedade de soja Perdiz (fazenda Tabarana) obtido pelo sensor Hyperion do dia 6 de fevereiro de 2005

(espalhamento frontal). Assim, os parâmetros geométricos (iluminação e visada) do PROSAIL foram ajustados exatamente às condições de obtenção da imagem Hyperion daquela data. Os parâmetros biofísicos como o IAF e DAF foram ajustados em 5 e 13°, respectivamente (simulando um dossel de soja fechado e um dossel planófilo, respectivamente). Os parâmetros como contribuição do solo, radiação difusa e hot spot foram mantidos conforme a Tabela 3.3.

Desta forma, foi possível avaliar se os valores definidos para os parâmetros bioquímicos das folhas durante a calibração do modelo nos testes preliminares foram adequados (Tabela 3.3). A partir de dados da literatura, os valores desses parâmetros bioquímicos foram ajustados de forma a obter o ajuste aceitável, comparado com o espectro de reflectância de superfície medido pelo Hyperion. Todos os testes foram feitos com coerência, segundo os limites apresentados na literatura para os distintos parâmetros. Após a obtenção do espectro que apresentou o melhor ajuste, os parâmetros biofísicos foram mantidos constantes e passou-se a avaliar a influência dos parâmetros dinâmicos (Tabela 3.4) em suas distintas combinações.

3.3.4 Avaliação dos espectros de reflectância em função do AZV

Para avaliar a influência do ângulo zenital de visada (AZV) na reflectância em função de um determinado ângulo zenital solar típico para a área de estudo (AZS=30°, considerando a latitude e o horário de passagem dos satélites) e de IAF foram elaborados gráficos, onde o AZV foi representado no eixo x, a reflectância no eixo y e, os distintos valores de IAF representados por cores. Os gráficos e o agrupamento dos dados foram realizados no aplicativo Origin® (ORIGINLAB CORPORATION, 2007). Além disso, foram elaborados gráficos bidimensionais com todas as variações do AZS e AZV nos eixos x e y, para distintos comprimentos de onda (representando as bandas). Neste caso, os valores da reflectância foram representados pela cor (matiz). Para elaborar estes gráficos, foi utilizado o aplicativo Surfer® (GOLDEN SOFTWARE INC., 2008). Para esta avaliação, o ângulo azimutal relativo (AAR) foi mantido constante em zero.

Por convenção, os gráficos, os ângulos referentes ao espalhamento frontal estão

representados pelo sinal de negativo (-). Todas as avaliações para as bandas foram feitas considerando o valor da reflectância de bandas estreitas (um único comprimento de onda; p.ex. 660 nm). O mesmo procedimento foi adotado para o cálculo dos índices de vegetação a partir dos dados simulados.

3.3.5 Avaliação dos espectros de reflectância em função do AZS

De forma semelhante à avaliação do AZV (discutido na seção 3.3.4), a influência do ângulo zenital solar na reflectância foi avaliada através da elaboração de gráficos em função de diferentes IAF e diferentes geometrias de visada (AZV). Novamente, o AAR foi mantido constante em zero (ou 180°). Todas as avaliações consideraram distintos valores de IAF.

3.3.6 Avaliação dos índices de vegetação em função do AZV e AZS

Após a avaliação dos AZV e do AZS sobre a reflectância, foram feitas avaliações dos efeitos da geometria de iluminação e visada sobre o NDVI, EVI, NDWI e outros índices (EVI-2, GNDVI). Para tal, foram elaborados gráficos e perfis considerando inicialmente variações do AZV para um determinado valor de AZS. Na sequência, foi avaliada a influência do AZS para valores constantes do AZV. Novamente, foram considerados diferentes valores de IAF e o valor zero para o AAR. Cabe lembrar que os índices de vegetação foram calculados para bandas estreitas (1 nm), visto que o uso das funções filtro do sensor Hyperin não alterou significativamente os valores dos índices de vegetação, considerando que as bandas do Hyperion também são estreitas.

3.3.7 Comparação da reflectância simulada com a reflectância observada pelo MODIS para variedades de soja

Por fim, os espectros simulados no PROSAIL foram reamostrados para comparação com espectros observados pelo MODIS. Foram selecionadas datas onde as imagens MODIS foram adquiridas com ângulo de visada oposto (retroespalhamento e espalhamento frontal) e valor de IAF constante (avaliado a partir dos dias após o plantio). A reamostragem foi feita no aplicativo ENVI® (ITT, 2008) observando as

funções de resposta das distintas bandas do MODIS. Apenas as bandas de 1 a 7 do MODIS foram avaliadas.

Para gerar os espectros de reflectância no PROSAIL, os dados de AZS, AZV e AAR foram ajustados de acordo com os dados reais coletados pelo sensor MODIS (simulando a posição do satélite). Após a simulação e reamostragem dos espectros, foram elaborados gráficos comparando os dados reais e os dados simulados. Durante a simulação, os parâmetros biofísicos e bioquímicos não foram alterados, com exceção dos valores de IAF, que foram ajustados de acordo com os dias após o plantio.

3.4 Efeitos da geometria de visada sobre a reflectância e índices de vegetação (NDVI e EVI) com dados MODIS

Para avaliar o impacto do ângulo zenital de visada (AZV) do MODIS sobre a reflectância e sobre os índices de vegetação NDVI e EVI, utilizou-se a sequência metodológica apresentada por Breunig et al. (2011) e que está sintetizada no fluxograma apresentado na Figura 3.4.

3.4.1 Impacto do AZV do MODIS sobre a reflectância de variedades de soja

A caracterização espectral e temporal das variedades de soja foi feita através do uso de 29 e 42 imagens de reflectância de superfície para os anos-safra 2004-2005 e 2005-2006, respectivamente. Foi feita uma avaliação visual das imagens para selecionar apenas imagens sem cobertura de nuvens. Os dados foram adquiridos nas resoluções de 250 e 500 metros (MOD09GA - Surface Reflectance Daily L2G Global 1 km and 500 m; e MOD09GQ - Surface Reflectance Daily L2G Global 250 m). Para extrair os dados espectrais das imagens MODIS foram elaboradas máscaras para cada variedade, respeitando um limite de dois pixels distantes dos limites dos talhões, de forma a evitar a contaminação espectral por alvos adjacentes.

Para fazer a avaliação do impacto do AZV do MODIS sobre a reflectância foram utilizados seis pares de imagens para o ano-safra 2004-2005 e sete pares de imagens para o ano-safra 2005-2006, obtidas em dias consecutivos (1 ou 2 dias de diferença

temporal) e com ângulos de visada opostos (retroespalhamento e espalhamento frontal). Os detalhes das imagens utilizadas são apresentados na Tabela 3.5. Este conjunto de dados permitiu que os efeitos do AZV fossem avaliados mantendo o estágio fenológico constante.

Avaliação dos efeitos da geometria de visada na reflectância observada pelo MODIS

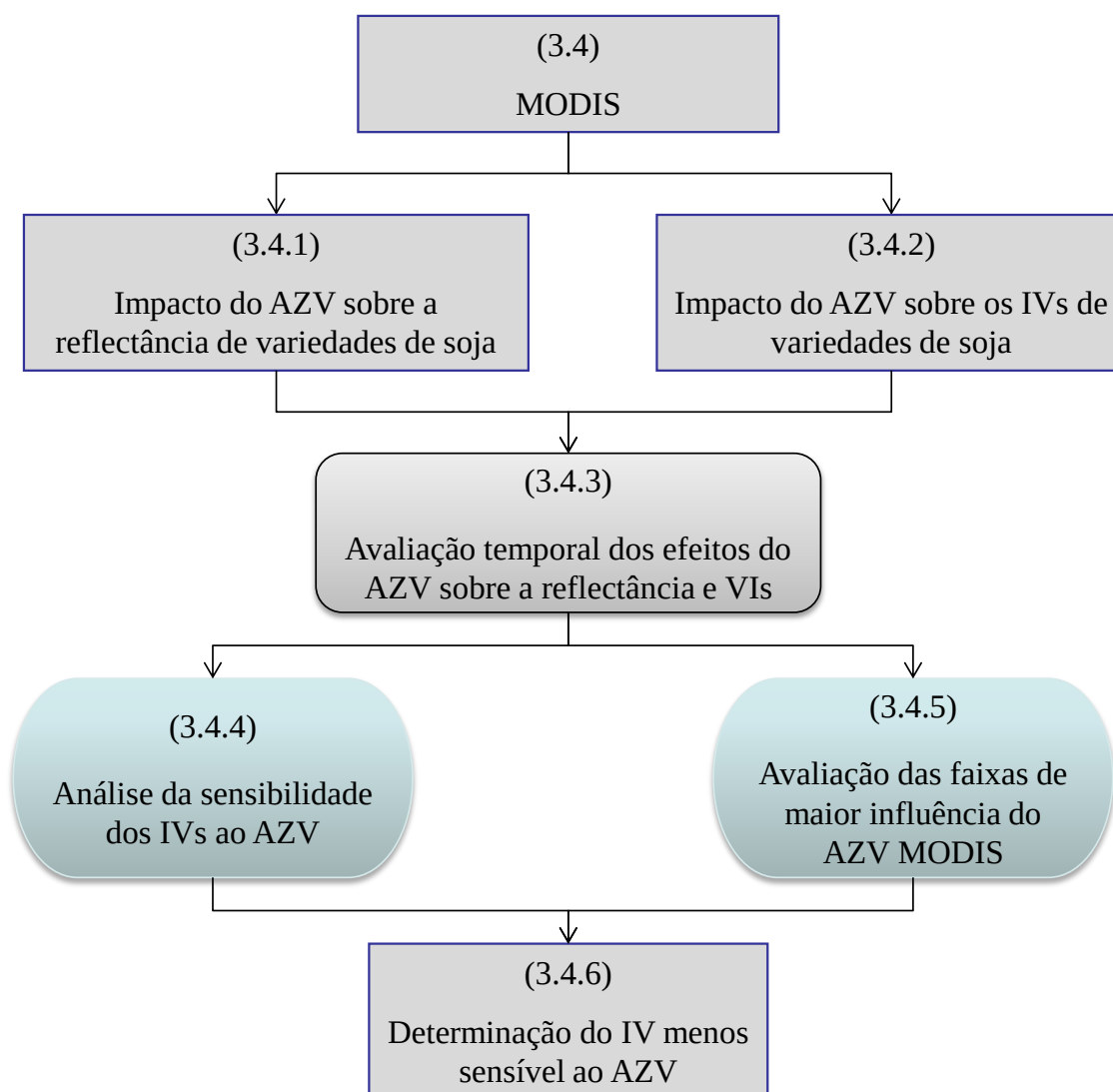


Figura 3.4 – Sequência do estudo da influência do ângulo zenital de visada (AZV) sobre a reflectância de superfície e índices de vegetação derivados do sensor MODIS.

Tabela 3.5 – Pares de imagens MODIS adquiridas em datas próximas e com ângulo zenital de visada oposto, para os anos-safra 2004-2005 e 2005-2006.

	Retroespalhamento Data	Ângulo Zenital de Visada (graus)	Espalhamento frontal Data	Ângulo Zenital de Visada (graus)*
2004-2005	08/12/2004	5	06/12/2004	-23
	27/01/2005	32	30/01/2005	-35
	05/02/2005	42	06/02/2005	-44
	21/02/2005	42	22/02/2005	-44
	12/04/2005	56	11/04/2005	-45
	15/04/2005	5	13/04/2005	-24
2005-2006	09/11/2005	4	07/11/2005	-24
	22/12/2005	41	21/12/2005	-59
	16/01/2006	50	15/01/2006	-52
	21/01/2006	20	19/01/2006	-9
	23/01/2006	42	24/01/2006	-44
	25/01/2006	57	22/01/2006	-58
	08/02/2006	42	09/02/2006	-44

* O sinal de negativo representa a direção do espalhamento frontal.

3.4.2 Impacto do AZV sobre os índices de vegetação de variedades de soja

O impacto do AZV sobre o NDVI calculado a partir dos dados de reflectância de superfície diária foi avaliado em função de diferentes classes de ângulo de visada e Dias Após o Plantio (DAP) (Tabela 3.6). As classes de ângulo foram estabelecidas de forma arbitrária e considerando um número mínimo aceitável de amostras em cada classe. Assim, foram calculados os coeficientes de inclinação da reta (β) entre os dados do espalhamento frontal e retroespalhamento. *A priori*, se o valor 1 estiver fora dos limites inferior e superior, os dados são estatisticamente diferentes. Foi adotado um nível de significância de 5%. O intercepto da regressão foi fixado em zero.

Tabela 3.6 – Classes de ângulo zenital de visada utilizadas para comparar o NDVI calculado para a direção do retroespalhamento e espalhamento frontal. *N* representa o número de pares de NDVI com direções de visada opostas, obtidos nas 13 datas apresentadas na Tabela 3.5.

Classe de ângulo	Dias após o plantio	<i>N</i>
0°-25°	< 45	18
0°-25°	45-90	13
0°-25°	> 90	8
25°-45°	< 45	9
25°-45°	45-90	10
25°-45°	> 90	33
45°-60°	< 45	23
45°-60°	45-90	28
45°-60°	> 90	8

3.4.3 Avaliação temporal dos efeitos do AZV sobre a reflectância e índices de vegetação da soja

Inicialmente, foi feita uma análise da variação da reflectância e dos índices de vegetação em função do desenvolvimento da soja (dias após o plantio). Foram elaborados gráficos representando a variação temporal da reflectância e dos índices de vegetação, considerando os dados derivados das imagens MODIS obtidas em dias consecutivos e ângulos de visada opostos para os anos-safra 2004-2005 (Tabela 3.7) e 2005-2006. Assim, espectros temporais para a reflectância das bandas do visível, IVP e SWIR foram construídos. Esta análise foi desenvolvida apenas para os dados da fazenda Tanguro, tendo em vista a disponibilidade de informações e o número de amostras.

Na sequência, foi feita uma avaliação dos efeitos da geometria de visada do MODIS (AZV) sobre os índices de vegetação, considerando um estágio fenológico fixo. Duas datas com imagens MODIS obtidas em dias consecutivos com AZV opostos foram selecionadas (em negrito na Tabela 3.7) representando um dossel de soja aberto e outro completamente fechado, respectivamente. Todas as análises foram feitas considerando diferentes variedades de soja.

Tabela 3.7 – Lista de imagens MODIS do ano-safra 2005-2006 utilizadas para avaliar as variações temporais do FRB e dos índices de vegetação.

Data	Ângulo de visada (°)	Direção do espalhamento	Dias após o plantio*
04/11/2005	41	Retroespalhamento	<i>Período de plantio</i>
06/11/2005	56	Retroespalhamento	<i>Período de plantio</i>
07/11/2005	-24	Espalhamento frontal	<i>Período de plantio</i>
09/11/2005	4	Retroespalhamento	<i>Período de plantio</i>
21/11/2005	-45	Espalhamento frontal	12
21/12/2005	-58	Espalhamento frontal	42
22/12/2005	41	Retroespalhamento	43
25/12/2005	-24	Espalhamento frontal	46
14/01/2006	32	Retroespalhamento	66
19/01/2006	-8	Espalhamento frontal	71
21/01/2006	20	Retroespalhamento	73
22/01/2006	-58	Espalhamento frontal	74
23/01/2006	42	Retroespalhamento	75
24/01/2006	-44	Espalhamento frontal	76
25/01/2006	57	Retroespalhamento	77
29/01/2006	-63	Espalhamento frontal	81
09/02/2006	-44	Espalhamento frontal	92
19/02/2006	62	Retroespalhamento	102
22/02/2006	19	Retroespalhamento	105
21/03/2006	50	Retroespalhamento	<i>Período de colheita</i>

* O dia 9 de novembro foi utilizado como referência para o início da data de plantio.

3.4.4 Análise da sensibilidade dos índices de vegetação ao AZV

A avaliação da influência do AZV sobre os índices de vegetação foi feita com base nos dados do produto “Surface Reflectance Daily L2G Global 1km and 500m” (MOD09GA). A partir deste produto, foram calculados os índices de vegetação apresentados na Tabela 3.8. Devido à presença de ruído (*stripping*) na banda 5 (centrada em 1240 nm), o NDWI original proposto por Gao (1996) não pôde ser calculado. Assim, duas formulações alternativas que exploram as bandas de absorção da água foram utilizadas (CHEN et al., 2005).

Tabela 3.8 – Índices de vegetação derivados das sete primeiras bandas do MODIS.

Índice de vegetação	Fórmula	Referência	Primeiras sete bandas do MODIS
NDVI	$(b2 - b1)/(b2 + b1)$	ROUSE et al. (1973)	b1 (620-670 nm)
EVI	$2.5 \left(\frac{(b2 - b1)}{(b2 + 6 * b1 - 7,5 * b3 + 1)} \right)$	HUETE et al. (2002)	b2 (841-876 nm)
NDWI ₁₆₄₀	$(b2 - b6)/(b2 + b6)$	CHEN et al. (2005)	b3 (459-479 nm)
NDWI ₂₁₂₀	$(b2 - b7)/(b2 + b7)$	CHEN et al. (2005)	b4 (545-565 nm)
			b5 (1230-1250 nm)
			b6 (1628-1652 nm)
			b7 (2105-2155 nm)

Após o cálculo dos índices de vegetação, foram elaborados gráficos representando a variação temporal dos índices de vegetação, considerando as diferentes variedades de soja. Assim, um total de 142 talhões, sendo 70 talhões cultivados na safra 2004-2005 e 72 talhões cultivados na safra 2005-2006, foram amostrados para a extração dos valores de reflectância. Na sequência, foram calculados os índices de vegetação e feitas as avaliações temporais considerando as direções de imageamento (retroespalhamento e espalhamento frontal).

3.4.5 Avaliação das faixas de maior influência do AZV MODIS

Nesta etapa foram avaliadas as faixas do espectro eletromagnético onde ocorrem as maiores variações da reflectância do MODIS. Para tal, foram elaborados gráficos de espalhamento considerando combinações entre as bandas do visível, IVP e SWIR. Essa análise foi estendida para distintos IAF (representados pelos dias após o plantio) e distintas variedades de soja.

3.4.6 Determinação do índice de vegetação menos sensível ao AZV

Inicialmente, foi aplicado o teste de normalidade dos dados Shapiro-Wilk (ORIGINLAB CORPORATION, 2007). A partir desse resultado, os testes de comparação não paramétricos foram utilizados.

Para determinar o índice de vegetação menos sensível aos efeitos direcionais (AZV MODIS), foi utilizado o teste estatístico não paramétrico Wilcoxon Signed Ranks Test (WILCOXON, 1945). Para reduzir o impacto do pequeno número de amostras, a técnica

de bootstrap foi utilizada com 1000 iterações. A inspeção do valor Z e do *p*-value permitiu extrair um indicativo das diferenças dentro da população de um determinado índice de vegetação, considerando as direções do retroespalhamento e do espalhamento frontal.

Em seguida, um teste adicional para avaliar a sensibilidade dos índices de vegetação (IV) consistiu em uma normalização angular dos índices de vegetação calculados para um estágio fenológico fixo e direções de observação opostas (retroespalhamento e espalhamento frontal). A normalização (*VN* = normalização de visada) utilizada é apresentada na Equação 3.1.

$$VN = \frac{IV_{\text{espalhamento frontal}} - IV_{\text{retroespalhamento}}}{IV_{\text{espalhamento frontal}} + IV_{\text{retroespalhamento}}} \quad 3.1$$

Quanto menor o valor de *VN* para um determinado índice de vegetação, menor tende a ser a influência dos efeitos direcionais. Por fim, foram elaborados gráficos de frequência dos índices de vegetação com menor sensibilidade aos efeitos direcionais. Os dados obtidos pelas duas metodologias foram comparados entre si e sua consistência avaliada.

3.5 Efeito da geometria de visada e iluminação sobre as estimativas de IAF

A análise dos efeitos da geometria de visada (AZV) e de iluminação (AZS) sobre as estimativas de IAF foi feita de acordo com as etapas apresentadas na Figura 3.5. As estimativas tiveram como base as imagens MODIS de reflectância diária de 250 m e 500 m.

3.5.1 Avaliação da qualidade do produto IAF MODIS

Uma avaliação das estimativas de IAF MODIS (MOD15A2) foi feita em função do estágio de desenvolvimento da soja. Para determinar o número de pixels de IAF estimados pelo modelo de transferência radiativa do MODIS (RT) e o número de pixels de IAF estimados com o algoritmo de backup (modelo empírico) sobre as quatro fazendas, foram utilizadas 23 imagens de IAF do produto MOD15A2 (Leaf Area

Index/FPAR 8-Day L4 Global 1 km) para ambos os anos-safra (2004-2005 e 2005-2006). Com base no produto de qualidade MODIS, foi possível determinar a frequência com que cada modelo foi utilizado.

Efeito da geometria de visada e iluminação sobre as estimativas de IAF

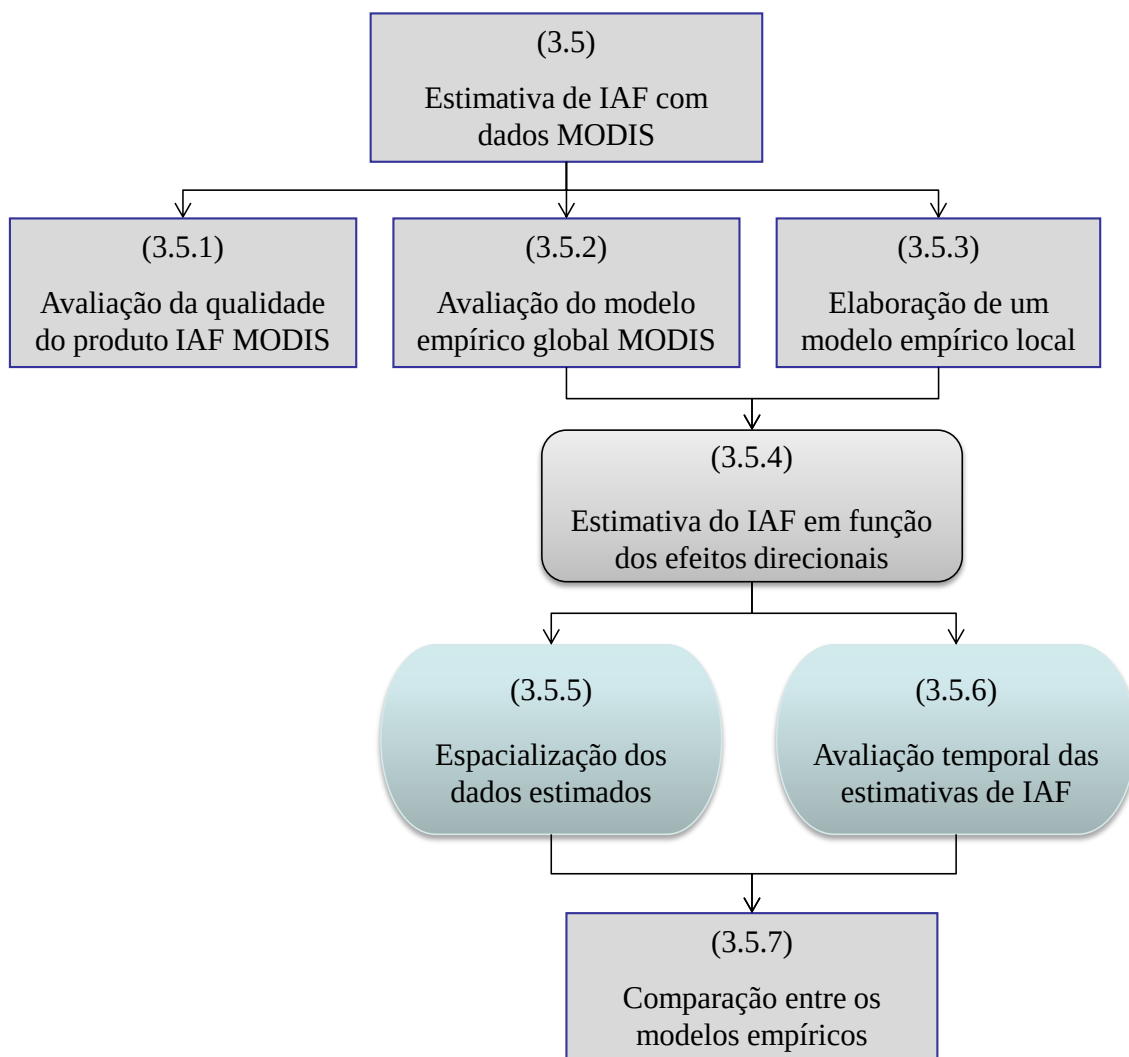


Figura 3.5 – Sequência do estudo da influência do ângulo zenital de visada e de iluminação sobre as estimativas de IAF através de modelos empíricos.

Para avaliar a qualidade da classificação do bioma, foi utilizada a imagem “LAI/fPAR Classification Scheme Type 3” do produto MOD12Q1 – Land Cover Type Yearly L3

Global 500 m. Além disto, foi determinada a quantidade de pixels extraídos da direção do espalhamento frontal e retroespalhamento, considerando uma composição hipotética de 8 dias, centrada em 17 de janeiro de 2006.

3.5.2 Avaliação do modelo empírico global MODIS

Uma análise detalhada do IAF estimado através de modelos empíricos foi realizada com base nas imagens no produto MOD09GQ (Surface Reflectance Daily L2G Global 250m). Inicialmente, os impactos da geometria de visada do sensor MODIS sobre o IAF foram avaliados considerando um “modelo empírico global” proposto por Knyazikhin et al. (1999). Foi selecionado o modelo empírico referente ao bioma 3, que compreende as culturas agrícolas, como a soja (Broadleaf crops). Detalhes sobre este modelo são apresentados no MOD15A2 *Algorithm Theoretical Basis Document* (ATDB; KNYAZIKHIN et al., 1999).

3.5.3 Elaboração de um modelo empírico local

O “modelo empírico local” para a estimativa do IAF consistiu da elaboração de uma equação de regressão entre o NDVI e o IAF estimado pelo modelo de transferência radiativa do MODIS (MODIS *main algorithm*). Para elaborar esta equação de regressão, foram considerados os pixels de alta qualidade derivados do produto IAF MODIS, gerados pelo modelo de transferência radiativa (RT). No total, foram utilizados 759 pixels de 1 km de resolução espacial extraídos do ano-safra 2004-2005, considerando todas as variedades e fazendas.

Para permitir uma comparação local, os dados do produto MOD09A15 (MODIS/Terra Surface Reflectance 8-Day L3 Global500m) (utilizado para calcular o NDVI) e os produtos da classificação do bioma (MOD12Q1 - Land Cover Type Yearly L3 Global 1km SIN Grid) foram reamostrados para a mesma resolução espacial do produto IAF MODIS (MOD15A2 - Leaf Area Index - Fraction of Photosynthetically Active Radiation 8-Day L4 Global 1km). Em outras palavras, toda a avaliação foi realizada considerando uma resolução espacial de 1 km.

3.5.4 Estimativa do IAF em função dos efeitos direcionais

A magnitude dos efeitos direcionais sobre os valores das estimativas de IAF produzidas através dos modelos empíricos “global” e “local” foi avaliada através da aplicação das equações de regressão sobre as imagens obtidas em dias consecutivos e com ângulos de visada opostos, para um dado estágio de desenvolvimento da soja (dias após o plantio). Assim, foi feita a subtração do valor do IAF estimado a partir da imagem do espalhamento frontal da estimativa elaborada com base na imagem de retroespalhamento ($IAF_{\text{espalhamento frontal}} - IAF_{\text{retroespalhamento}}$).

3.5.5 Espacialização dos dados estimados

A espacialização das estimativas de IAF (e diferenças entre elas), geradas através das equações de regressão entre NDVI e IAF, foi feita no aplicativo Surfer® (GOLDEN SOFTWARE INC., 2008) utilizando o interpolador krigeagem linear sem ajuste do semivariograma e análise dos erros (desvio padrão).

Após a elaboração de estimativas (espaciais) para as imagens de retroespalhamento e de espalhamento frontal obtidas em dias consecutivos, foi feita a subtração do IAF estimado pela imagem do retroespalhamento do IAF estimado pela imagem de espalhamento frontal. O mesmo procedimento foi adotado para ambos os modelos empíricos testados e para a avaliação espacial do NDVI.

3.5.6 Avaliação temporal das estimativas de IAF

A avaliação temporal do IAF foi feita para as estimativas de IAF geradas pelo modelo empírico “global” para diferentes datas (dias após o plantio). Para cada par de imagens MODIS obtidas em dias consecutivos e ângulos opostos (retroespalhamento e espalhamento frontal), foi feita uma estimativa para cada variedade. Assim, foi possível elaborar curvas de IAF representando a variação temporal do IAF em função dos efeitos direcionais.

A avaliação temporal se restringiu à variedade Emgopa e Monsoy 8914 porque para as demais variedades não foram obtidos pares de imagens MODIS com ângulos de visada

opostos suficientes para representar cada estágio de desenvolvimento da soja (representado pelos dias após o plantio).

3.5.7 Comparação entre os modelos empíricos

A comparação entre os modelos empíricos “global” e “local” foi feita através da elaboração de gráficos de espalhamento e cálculo do coeficiente de correlação. Ambos os modelos foram comparados com o IAF gerado pelo algoritmo backup do MODIS, ajustados para o bioma 3 (broadleaf crops).

3.6 Integração dos resultados do efeito da geometria de visada e iluminação sobre a reflectância

Esta avaliação final foi realizada considerando a geometria de visada e de iluminação e o ciclo de desenvolvimento da soja. Assim, buscou-se apresentar uma visão geral caracterizando o comportamento da reflectância em função da geometria de visada e iluminação, identificar os melhores índices de vegetação e as direções de visada mais adequadas de forma a fornecer informações otimizadas para modelos de crescimento de culturas e de estimativa de produtividade. As etapas da integração são apresentadas na Figura 3.6.

Os efeitos do AAR, AZS e do AZV foram avaliados através de uma estimativa de IAF realizada com o modelo empírico “local”. Novamente, foram elaborados gráficos de espalhamento considerando diferentes valores de IAF utilizados para gerar as simulações no PROSAIL. *A priori*, esperava-se que as estimativas de IAF através do modelo empírico “local” fossem semelhantes aos valores utilizados no processo de simulação do espectro de reflectância. Esta avaliação consistiu em fazer um apanhado geral das capacidades do PROSAIL para caracterizar o FRB com distintas configurações de geometria de iluminação e de visada.

Para investigar as relações entre os dados de reflectância (MODIS e PROSAIL) com os índices de vegetação (NDVI e EVI), foram elaborados gráficos de espalhamento e feitas avaliações dos efeitos do hot spot (considerando MODIS e PROSAIL).

Por fim, discussão sobre o impacto dos efeitos direcionais (geometria de iluminação e de visada) procurou integrar os resultados observados (reflectância) obtidos pelo sensor MODIS e os dados simulados (PROSAIL). Nesta seção, procurou-se fazer uma avaliação final dos modelos empíricos, com enfoque em suas limitações para estimar o IAF.

Integração dos resultados do efeito da geometria de visada e iluminação sobre o FRB

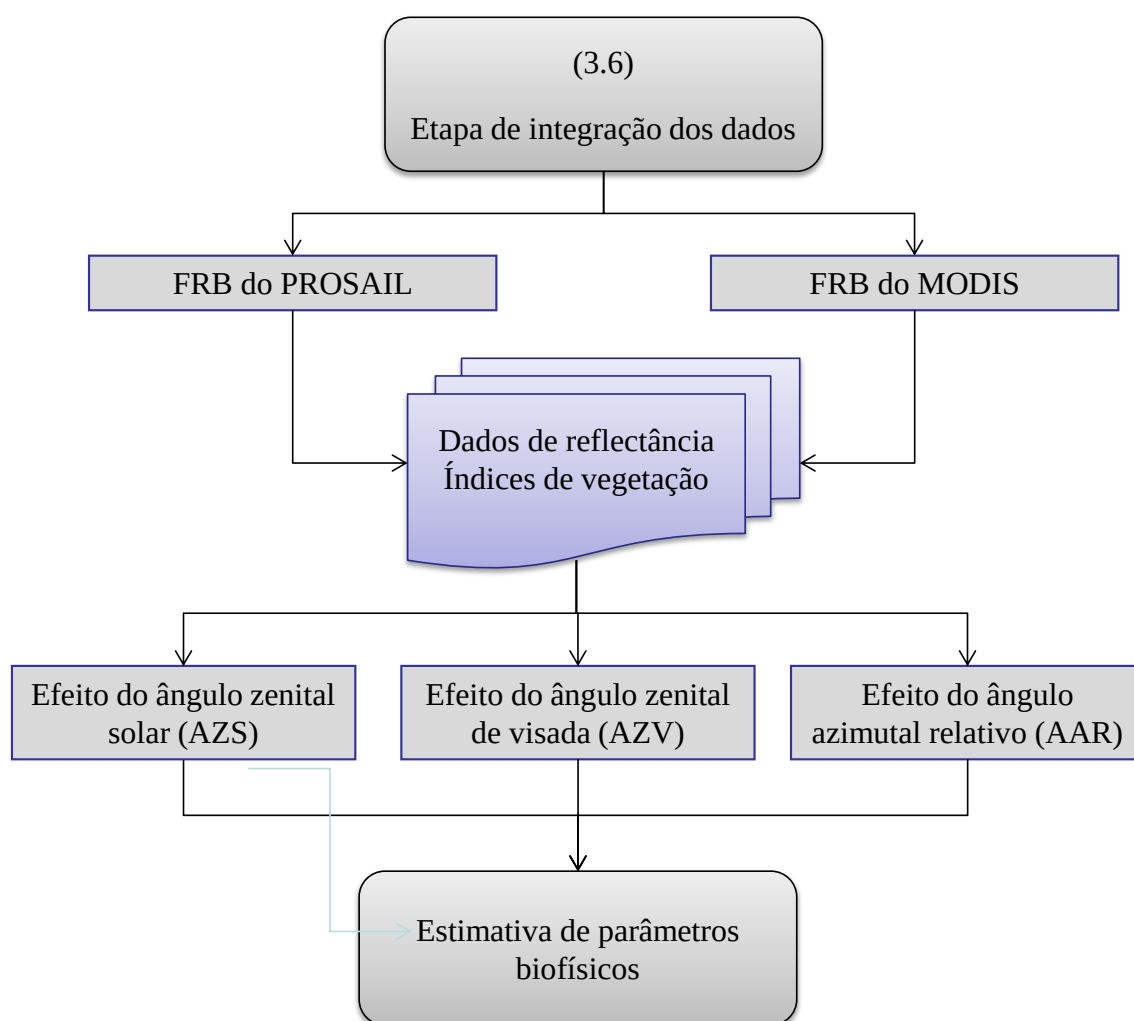


Figura 3.6 – Fluxograma de integração e discussão dos resultados.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Estudo da influência da geometria de iluminação e de visada na reflectância e nos índices de vegetação com simulações no PROSAIL

No sentido de compreender como os efeitos direcionais afetam a reflectância, nesta seção são discutidos os efeitos dos principais parâmetros biofísicos da soja sobre o fator de reflectância bidirecional, bem como o ajuste ao espectro de reflectância medido pelo sensor Hyperion, considerando distintas variedades de soja.

4.1.1 Ajuste dos parâmetros biofísicos e geométricos no modelo PROSAIL

O uso de modelos de transferência radiativa permite uma ampla avaliação dos efeitos direcionais e geométricos com base em simulações matemáticas e variações dos parâmetros de entrada. É possível simular diversas condições de imageamento e antecipar os possíveis efeitos direcionais e geométricos associados a cada condição de imageamento de sensores aéreos ou orbitais. Assim, para entender como os efeitos direcionais e geométricos afetam a reflectância de dosséis de soja, o modelo PROSAIL foi ajustado para simular diversas condições passíveis de serem assumidas pelo sensor MODIS ou Hyperion. Um paralelo entre um espectro de reflectância de superfície do sensor hiperespectral Hyperion e o espectro simulado pelo PROSAIL mostra em caráter de validação que o modelo permite reproduzir adequadamente a reflectância de superfície de dosséis de soja (Figura 4.1).

Ao utilizar os parâmetros geométricos da imagem Hyperion de 8 de fevereiro de 2005 no modelo PROSAIL (simulando a posição exata do sensor no momento da aquisição da imagem) foi possível obter um espectro bem ajustado na faixa espectral IVP e do SWIR. Tanto a magnitude da reflectância como a forma geral do espectro foram bem reproduzidas nestas duas faixas espectrais. Algumas diferenças foram observadas possivelmente associadas à presença de ruído nas bandas do Hyperion e às limitações do PROSAIL de reproduzir a forte banda de absorção pela água na faixa espectral em torno de 1200 nm. Na borda vermelha (*red edge*), o ajuste foi bastante satisfatório. O ponto de inflexão em torno de 800 nm foi fortemente influenciado pela concentração de

pigmentos marrons (*brown pigments*), de acordo com o processo de ajuste dos parâmetros biofísicos.

Apesar de representar bem um típico espectro de reflectância da soja obtido em laboratório, a simulação do PROSAIL superestimou a reflectância nas bandas do azul (em torno de 466 nm) e do verde (553 nm), mas apresentou um bom ajuste à reflectância na banda do vermelho (660 nm). No azul, os efeitos atmosféricos podem ajudar a explicar esta diferença. Na banda do verde, o efeito da geometria de aquisição das imagens Hyperion fora do nadir (espalhamento frontal) pode estar causando uma redução na reflectância de comprimentos de onda menores. O mesmo efeito foi encontrado para imagens MODIS (não mostrado nessa seção). Contudo, pode ser uma limitação do PROSAIL para simular estas condições geométricas.

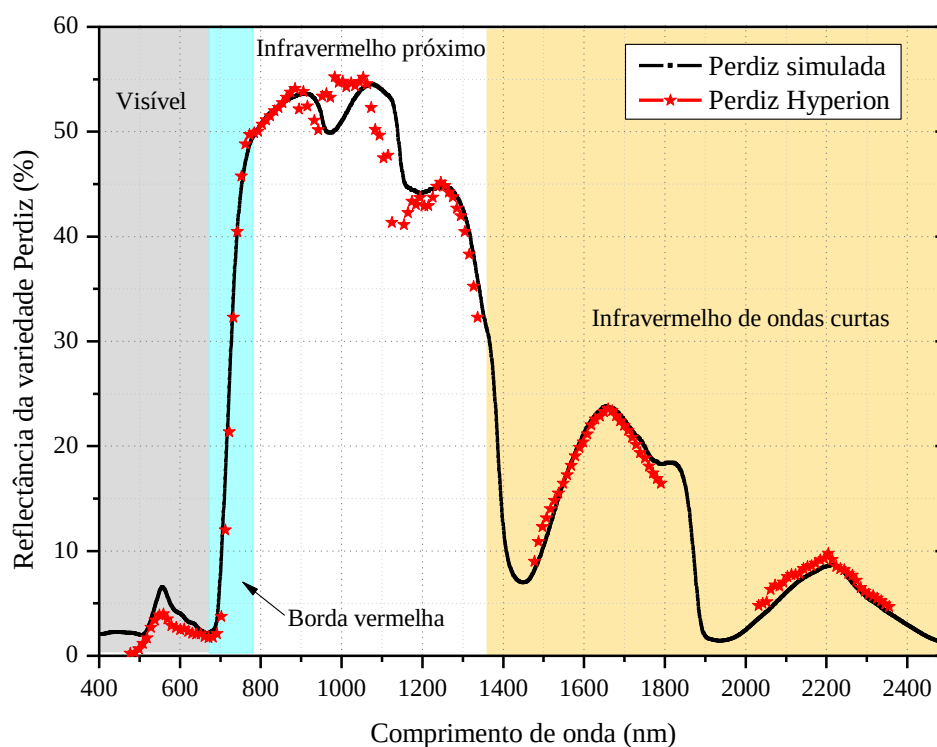


Figura 4.1 – Comparação entre os espectros medidos e simulados de reflectância da variedade de soja Perdiz do ano safra 2004-2005. A imagem Hyperion foi obtida em 8 de fevereiro de 2005 na direção do espalhamento frontal (AZV = - 21,5°), com AZS de 31° e com AAR de -64°.

O efeito *hot spot* do modelo PROSAIL foi definido em 0,01 para ajustar à imagem Hyperion. Contudo, ao reduzir muito este parâmetro, os efeitos direcionais são

restringidos a uma pequena amplitude de ângulos próximos ao ponto específico do *hot spot*. Desta forma, para avaliar os efeitos direcionais e geométricos e para fazer as comparações com o sensor MODIS, o parâmetro *hot spot* foi ajustado para 0,2 de forma a reproduzir adequadamente estes efeitos (ATZBERGER, 2010) (Figura 4.2).

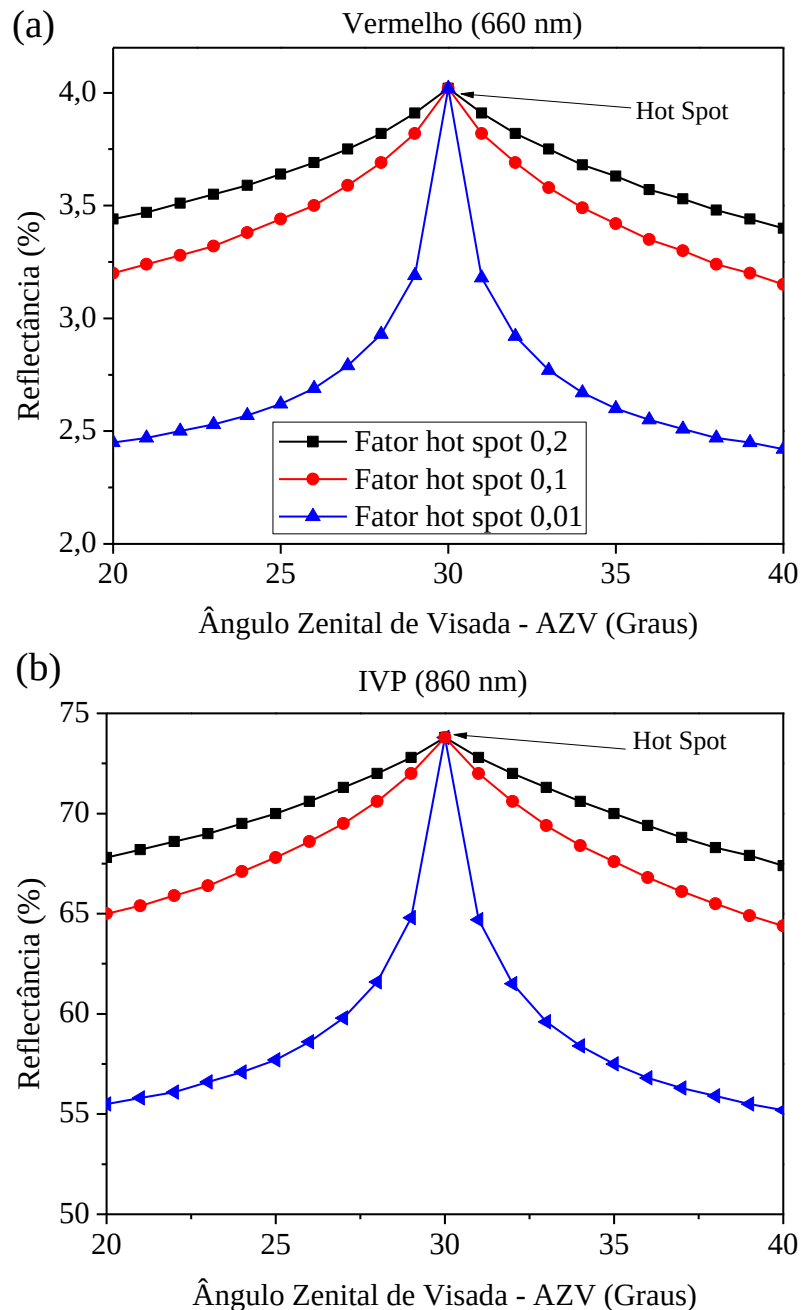


Figura 4.2 – Efeito do fator hot spot na reflectância na banda do (a) vermelho e do (b) IVP. O AZS foi fixado em 30°.

4.1.2 Efeito do IAF e da DAF na reflectância simulada

A avaliação do efeito do IAF sobre a reflectância mostrou-se de acordo com a literatura (VERHOEF, 1984; JACQUEMOUD et al., 2006; VERHOEF et al., 2007; JACQUEMOUD et al., 2009). À medida que o IAF aumentou, ocorreu maior absorção nas bandas do visível, especialmente nas do azul e vermelho, devido à maior presença de pigmentos. No IVP ocorreu um forte aumento da reflectância, devido ao maior espalhamento interno, ao passo que no SWIR a reflectância diminuiu devido à maior presença de água (Figura 4.3). Para valores de IAF baixos, até 1, a reflectância do vermelho retratou basicamente a contribuição do solo (o Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico). A partir de um IAF 5, verificou-se uma saturação em todas as faixas do espectro.

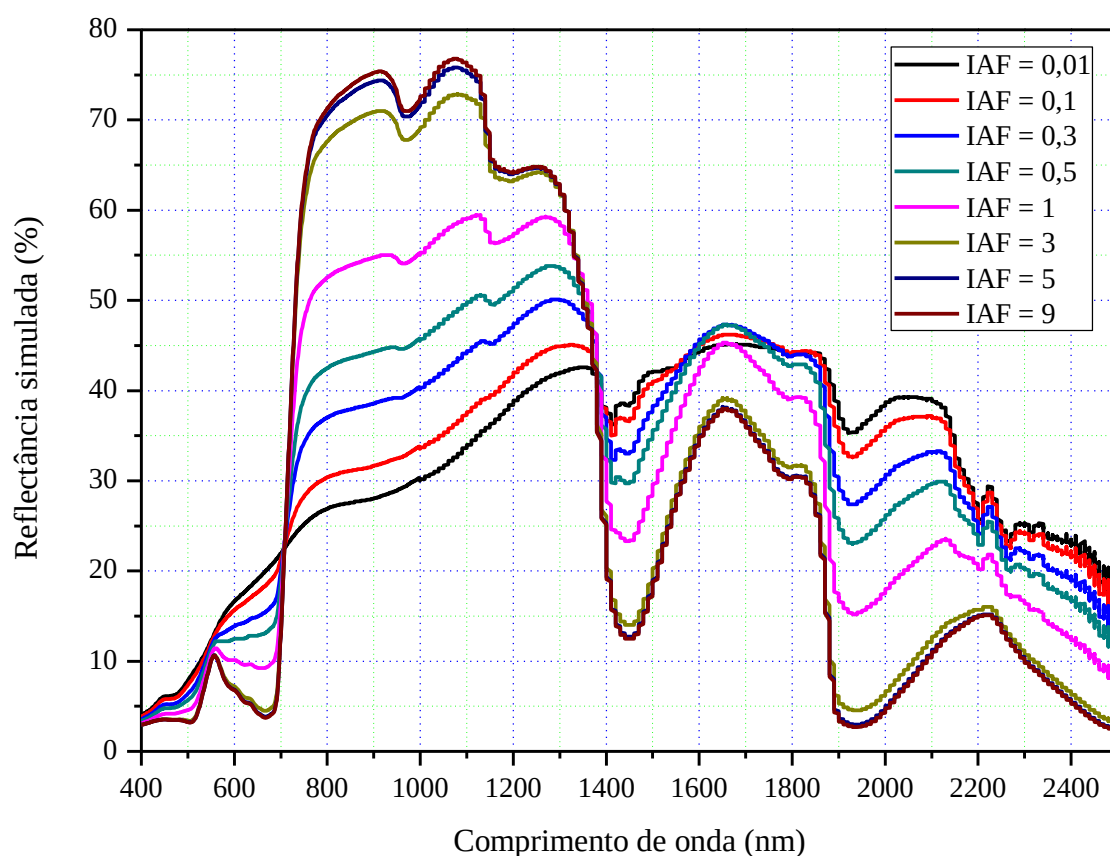


Figura 4.3 – Variação da reflectância em função do índice de área foliar (IAF) com base nos resultados do modelo PROSAIL com parâmetros biofísicos ajustados para a variedade Perdiz (safra 2004-2005).

Além do IAF, a distribuição angular das folhas (DAF) pode alterar significativamente a reflectância de um dossel. Estas modificações são mais fortes na faixa do IVP e no SWIR. No IVP a transição de uma folha erectófila (DAF $\approx$ 70-80) para uma folha planófila (DAF $\approx$ 10-20), praticamente dobra a magnitude da reflectância (Figura 4.4). Nas simulações a partir deste ponto, foi utilizado o valor médio de 13° para a DAF.

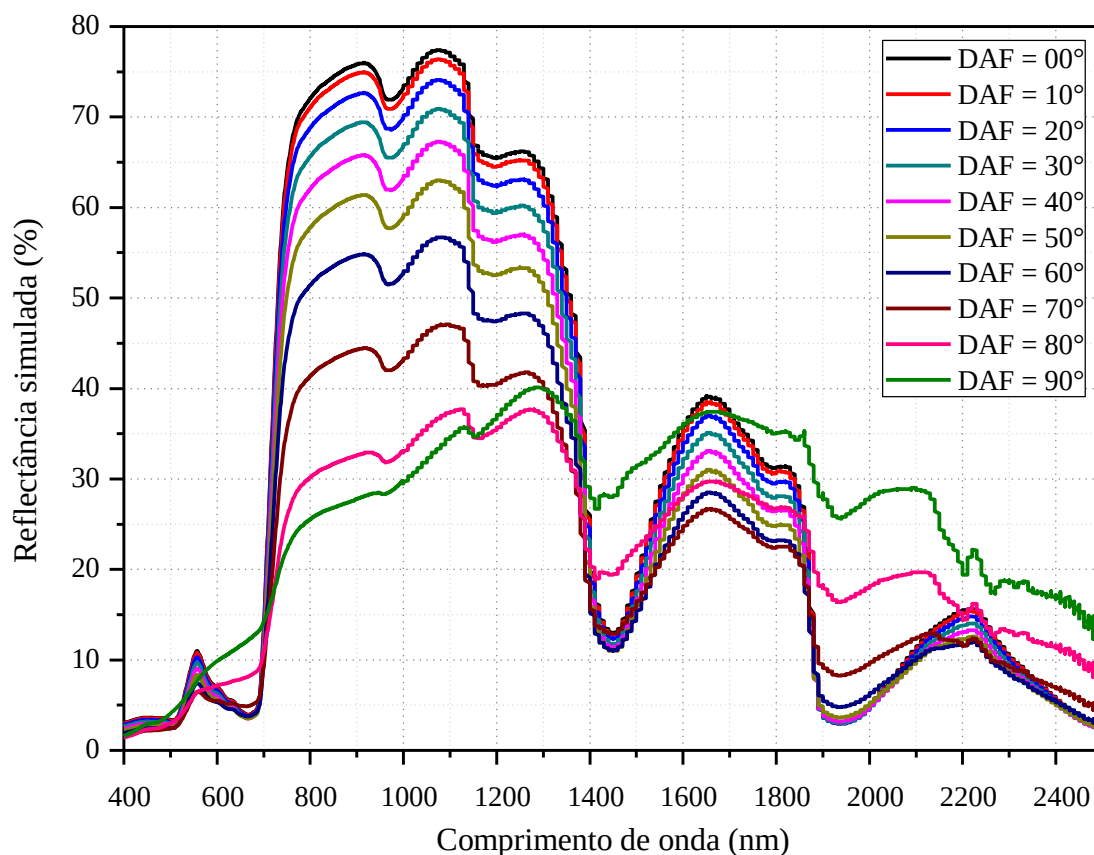


Figura 4.4 – Variação da reflectância em função da distribuição angular de folhas (DAF) com base nos resultados do modelo PROSAIL com parâmetros biofísicos ajustados para a variedade Perdiz (safra 2004-2005). O valor de IAF utilizado na simulação foi 5.

4.1.3 Avaliação do ângulo azimutal relativo (AAR) sobre os espectros de reflectância simulados pelo PROSAIL

O impacto do ângulo azimutal relativo (AAR) sobre a reflectância de dosséis de soja foi estudado com as demais variáveis do modelo mantidas constantes (apenas o IAF variando de 1 a 7). A Figura 4.5 e a Figura 4.6 têm a fonte de iluminação fixa (p. ex. Sol com um AZS = 30°) e a geometria de AAR variando de 0° (sensor atrás da fonte de

iluminação) até 180° (sensor em frente à fonte de iluminação), considerando os dois sentidos (abertura para a direita e esquerda da fonte de iluminação). Os valores negativos são um artifício computacional para representar os 360° do AAR. Os ângulos azimutais relativos inferiores a $\pm 90^\circ$ representam a direção do retroespalhamento e os ângulos maiores, a direção do espalhamento frontal.

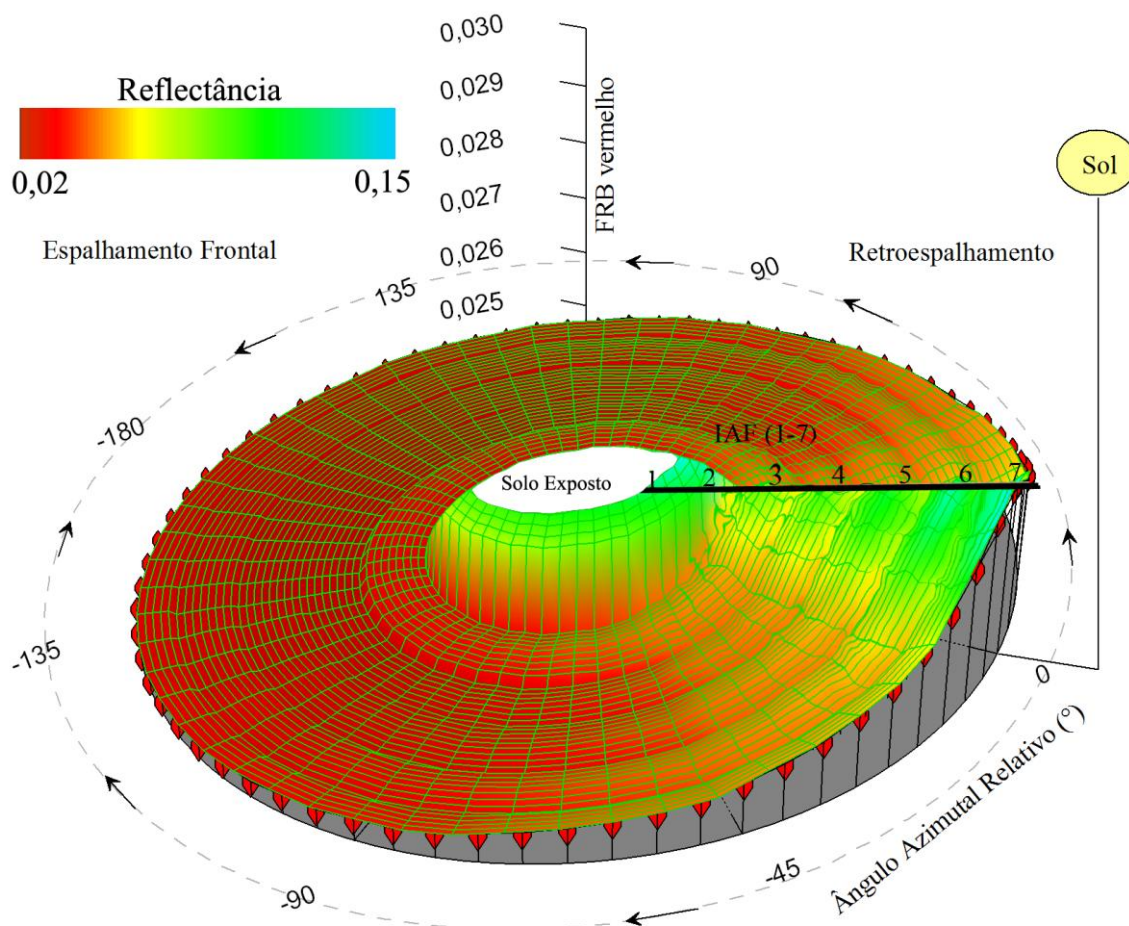


Figura 4.5 – Efeito do Ângulo Azimutal Relativo (AAR) sobre a reflectância simulada pelo PROSAIL da banda do vermelho (660 nm) para distintos IAF. Foi considerado um Ângulo Zenital de Visada (AZV) de 26° (retroespalhamento) e um Ângulo Zenital Solar (AZS) de 30° . O plano de 0° até $\pm 180^\circ$ no eixo x indica o plano principal de espalhamento. As ondulações entre os distintos IAF são resultantes do interpolador (krigeagem).

Os resultados mostraram que a reflectância das bandas do vermelho (Figura 4.5) e do IVP (Figura 4.6) apresenta variações mais significativas na direção do

retroespalhamento, considerando o plano principal de espalhamento da radiação. Ainda com base nessas figuras, verificou-se que a reflectância da banda do vermelho (660 nm) apresentou valores mais elevados para um IAF de 1 e passou a decair para um IAF de 2 e, depois passou a aumentar gradualmente à medida que o IAF atingiu o valor 7. Este efeito pode ser visualizado com mais facilidade através dos perfis da reflectância para a banda do vermelho (Figura 4.7) considerando típicos valores de AZV (26°, retroespalhamento) e AZS (30°). Para a banda do IVP (Figura 4.8), a reflectância na direção do retroespalhamento (plano principal de espalhamento) aumentou à medida que o IAF foi incrementado na modelagem. Assim, possivelmente, a banda do vermelho sofreu influência do substrato (Latossolo Vermelho Amarelo) quando o IAF foi inferior a 2. À medida que o dossel foi fechando (IAF de 2 a 7), o efeito do solo foi eliminado.

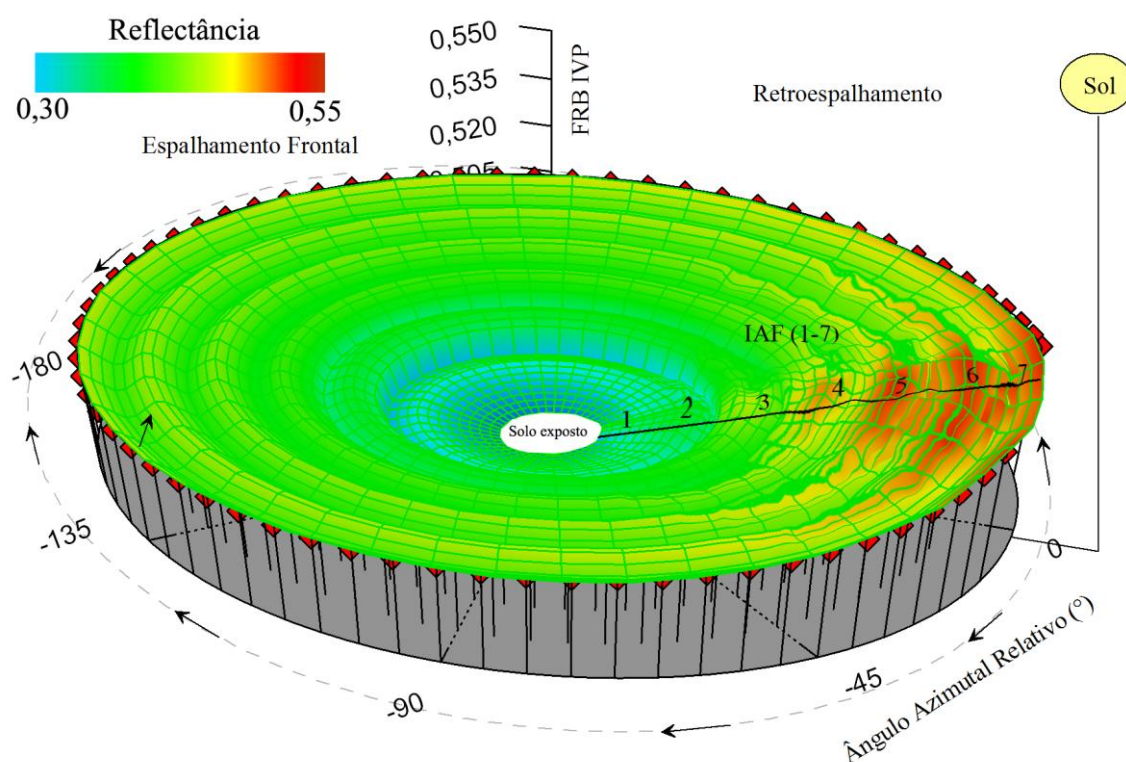


Figura 4.6 – Efeito do Ângulo Azimutal Relativo (AAR) sobre a reflectância simulada pelo PROSAIL da banda do IVP (860 nm) para distintos IAF. Foi considerado um Ângulo Zenital de Visada (AZV) de 26° (retroespalhamento) e um Ângulo Zenital Solar (AZS) de 30°. O plano de 0° até ±180° no eixo x indica o plano principal de espalhamento. As ondulações entre os distintos IAF são resultantes do interpolador (krigeagem).

Considerando ambas as bandas (vermelho e IVP), o aumento do efeito do AAR na reflectância na direção do retroespalhamento (plano principal), à medida que o IAF aumentou, está associado à maior presença de componentes do dossel sendo iluminados e à presença do efeito do hot spot. Este resultado confirma a importância da determinação correta dos parâmetros de hot spot (o valor de 0,2 foi utilizado para o hspot) no processo de simulação da reflectância. À medida que valores de hspot utilizados no PROSAIL foram aumentados, verificou-se uma propagação lateral (para ângulos além do hot spot teórico) para ambos os sentidos (direita e esquerda) do aumento da reflectância.

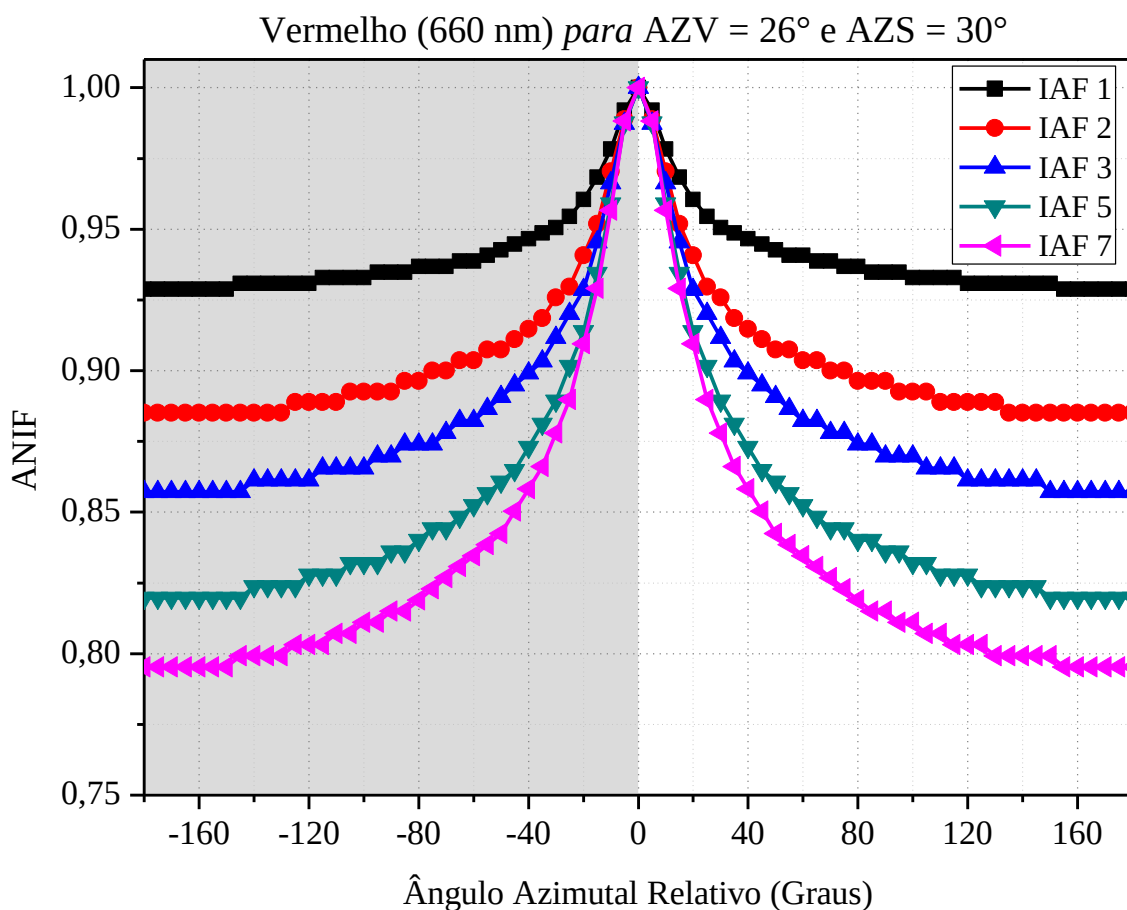


Figura 4.7– Efeito do Ângulo Azimutal Relativo (AAR) sobre a reflectância simulada pelo PROSAIL normalizada para o nadir (ANIF) da banda do vermelho (660 nm) para distintos valores de IAF. Foi considerado um Ângulo Zenital de Visada (AZV) de 26° (retroespalhamento) e um Ângulo Zenital Solar (AZS) de 30°. O plano de 0° até $\pm 180^\circ$ no eixo x indica o plano principal de espalhamento.

Em geral, o impacto do AAR foi mais significativo para a banda do vermelho (ANIF variou de 0,785 a 1) quando comparado com a do IVP (ANIF de 0,88 a 1). Esse resultado concorda com os resultados de Leblon et al. (1996), que mostraram que o NDVI sofre mais influência da reflectância da banda do vermelho, considerando diferentes geometrias de aquisição dos dados.

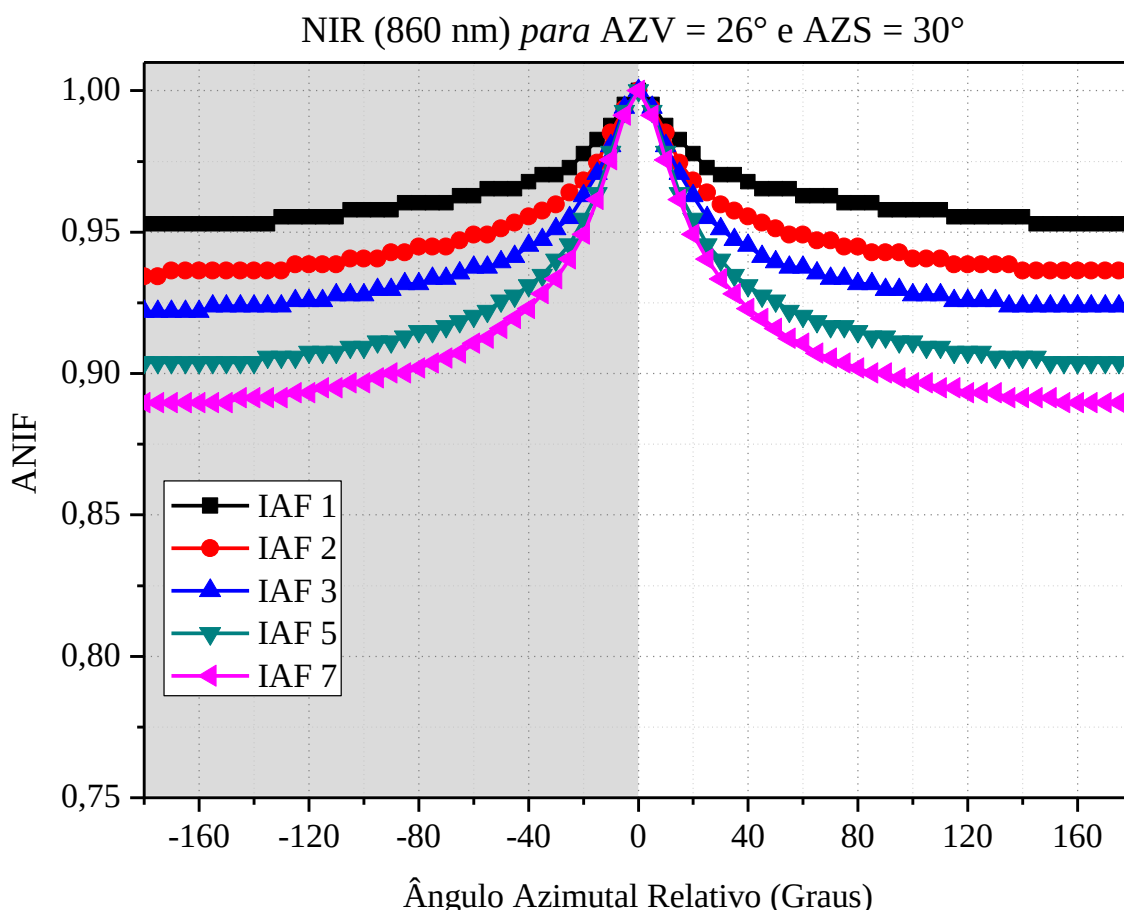


Figura 4.8 - Efeito do Ângulo Azimutal Relativo (AAR) sobre a reflectância simulada pelo PROSAIL normalizada para o nadir (ANIF) da banda do IVP (860 nm) para distintos valores de IAF. Foi considerado um Ângulo Zenital de Visada (AZV) de 26° (retroespalhamento) e um Ângulo Zenital Solar (AZS) de 30°. O plano de 0° até $\pm 180^\circ$ no eixo x indica o plano principal de espalhamento.

As demais avaliações ao longo desta seção foram baseadas em um único valor de AAR (fixado em 0°; sensor atrás da fonte de iluminação), tendo em vista que somente na direção do retroespalhamento, do plano principal de espalhamento, as variações da reflectância foram perceptíveis.

4.1.4 Avaliação do efeito do ângulo zenital de visada (AZV) sobre os espectros de reflectância simulados pelo PROSAIL

A Figura 4.9 ilustra as distintas configurações geométricas simuladas para avaliar o efeito do AZV (Figura 4.9 a) e do AZS (Figura 4.9 b) sobre a reflectância, considerando o plano principal de espalhamento (AAR de 0° a 180°). As simulações da reflectância em função de diferentes valores de IAF e ângulos zenitais de visada (AZV) mostraram que, à medida que o IAF aumenta, os efeitos direcionais são reduzidos, concordando com a literatura (EPIPHANIO; HUETE, 1995; WALTER-SHEA et al., 1997; GALVÃO et al., 2010; BREUNIG et al., 2011). A reflectância da banda do vermelho (Figura 4.10) apresentou forte influência do efeito hot spot na direção do retroespalhamento, resultando em valores de reflectância maiores para ângulos próximos ao hot spot (AZV=30° e AZS=30° na Figura 4.10). Ainda na direção do retroespalhamento, após o ponto de hot spot, a reflectância apresentou um gradativo decréscimo conforme o AZV aumentou. Na condição de IAF baixo (1) o menor valor de reflectância foi encontrado para o AZV de 70° (direção do retroespalhamento na Figura 4.10).

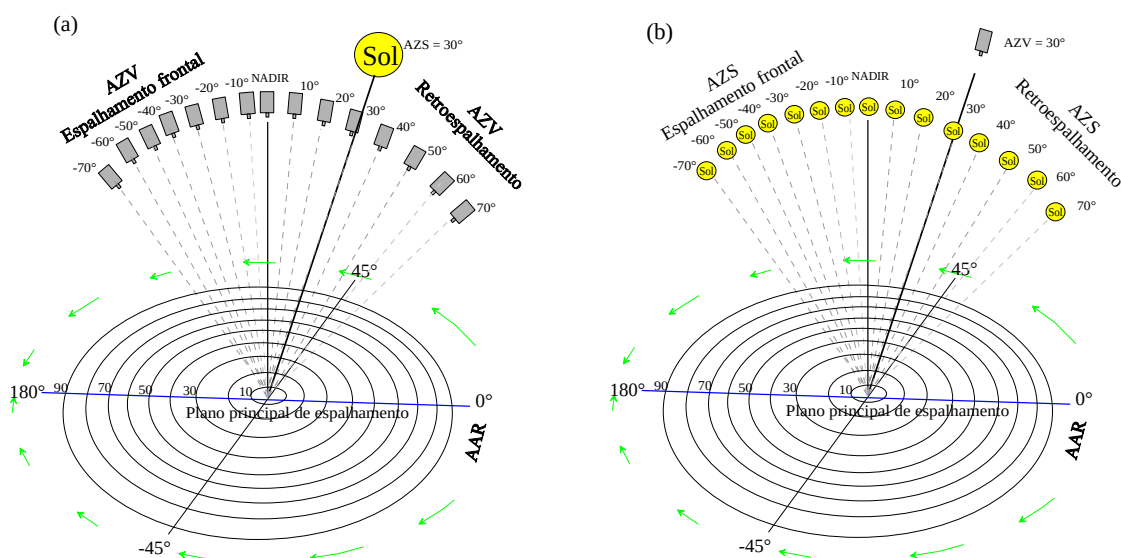


Figura 4.9 – Ilustração da configuração geométrica simulada para (a) variações do AZV e (b) AZS, variando de -70° a 70°, nas direções do espalhamento frontal e retroespalhamento.

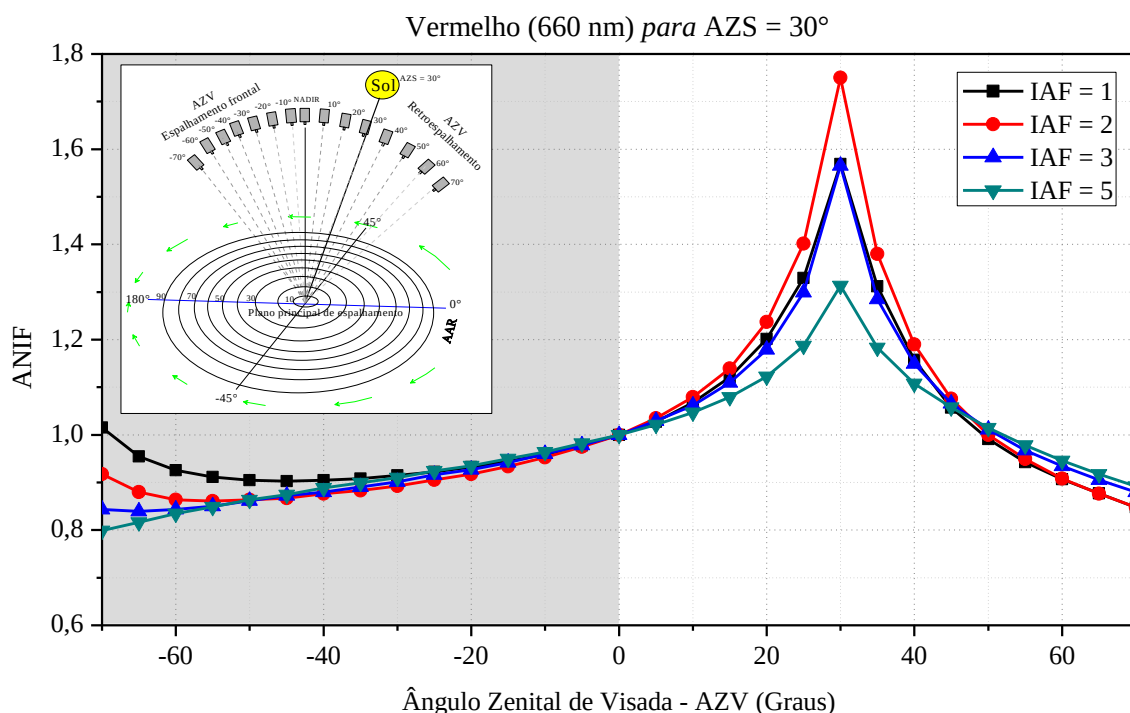


Figura 4.10 – Efeito do Ângulo Zenital de Visada (AZV) sobre a reflectância simulada pelo PROSAIL da banda do vermelho (660 nm) normalizada (ANIF) em função do IAF. As direções do espalhamento frontal (em cinza e AZV negativos) e do retroespalhamento (branco e AZV positivos) estão indicadas. O Ângulo Azimutal Relativo (AAR) foi mantido fixo em zero (plano principal de espalhamento). O Ângulo Zenital Solar foi mantido fixo em 30°.

Na direção do espalhamento frontal, a reflectância da banda do vermelho apresentou um relativo decréscimo para AZV de até aproximadamente 20°, e passou a apresentar um comportamento assintótico para AZV entre aproximadamente 20° e 60°. Para AZV acima de 60°, o comportamento da reflectância no vermelho passou a ter forte relação com o IAF. Para valores de IAF de até 2, a reflectância aumentou e para valores de IAF acima de 2 a reflectância do vermelho diminuiu. Para valores acima de 2, o dossel tende a estar completamente fechado. O impacto do AZV sobre as bandas do azul (Figura 4.11) e do verde (não mostrado) foi similar aos resultados obtidos para a banda do vermelho. O azul apresentou uma saturação da reflectância com um IAF mais baixo (até 2) em relação ao ponto de saturação do vermelho (IAF de aproximadamente 3).

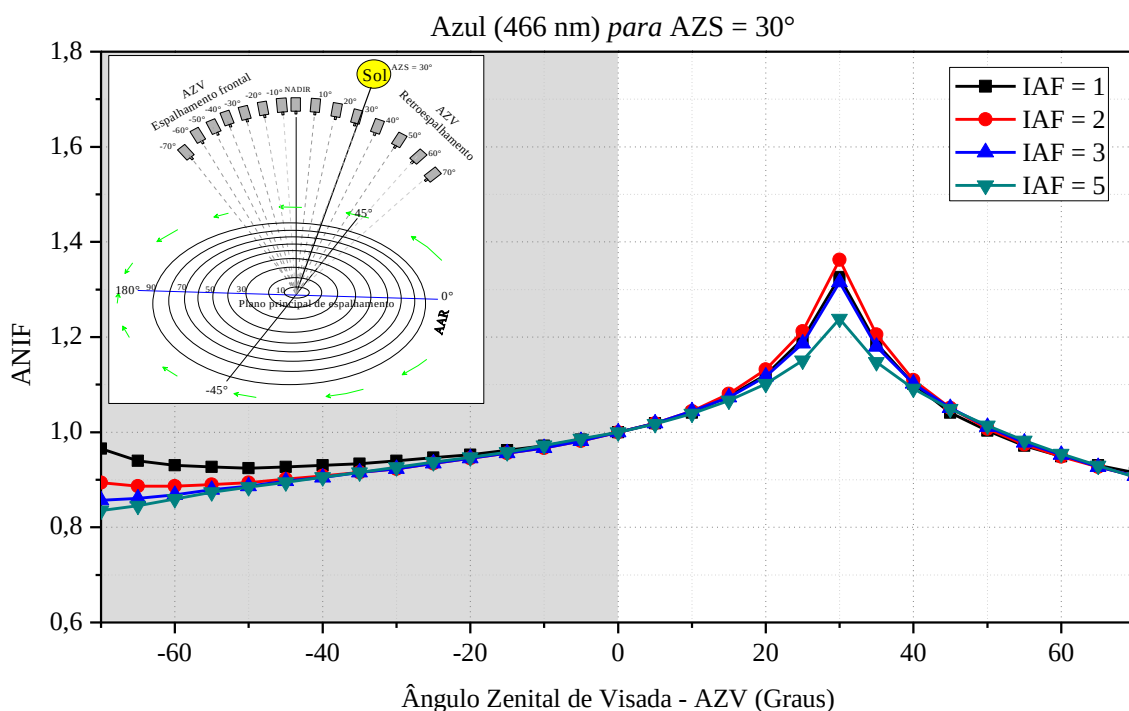


Figura 4.11 – Efeito do Ângulo Zenital de Visada (AZV) sobre a reflectância simulada pelo PROSAIL da banda do Azul (466 nm) normalizada (ANIF) em função do IAF. As direções do espalhamento frontal (em cinza e AZV negativos) e do retroespalhamento (branco e AZV positivos) estão indicadas. O Ângulo Azimutal Relativo (AAR) foi mantido fixo em zero (plano principal de espalhamento). O Ângulo Zenital Solar foi mantido fixo em 30°.

Resultados semelhantes foram encontrados para o IVP (Figura 4.12). O máximo de reflectância ocorreu no ponto de hot spot. À medida que a contribuição do substrato diminuiu e o IAF aumentou, verificou-se que as diferenças atribuídas aos efeitos de ângulo de visada diminuíram. O ponto de mínima reflectância ocorreu para o AZV de -70° na direção do espalhamento frontal.

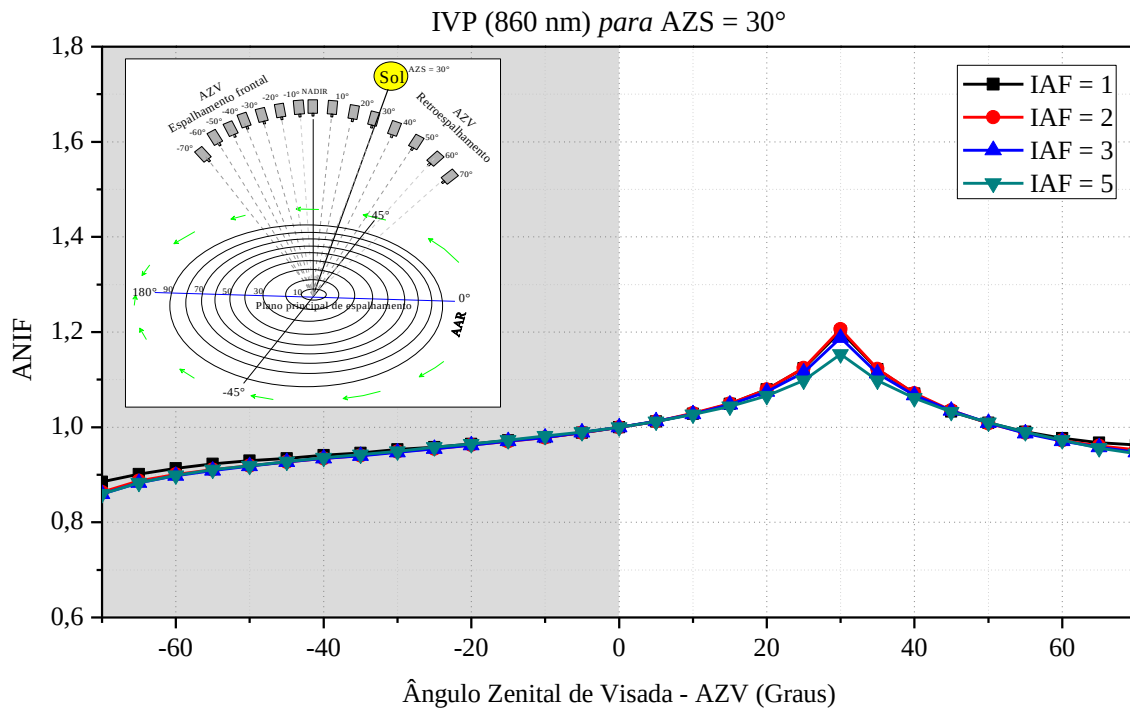


Figura 4.12 – Efeito do Ângulo Zenital de Visada (AZV) sobre a reflectância simulada pelo PROSAIL da banda do IVP (860 nm) normalizada (ANIF) em função do IAF. As direções do espalhamento frontal (em cinza e AZV negativos) e do retroespalhamento (branco e AZV positivos) estão indicadas. O Ângulo Azimutal Relativo (AAR) foi mantido fixo em zero (plano principal de espalhamento). O Ângulo Zenital Solar foi mantido fixo em 30°.

Para avaliar o comportamento da reflectância em função de diferentes AZV e de distintos AZS, foram elaborados gráficos bidimensionais para diferentes bandas do espectro simulado, compreendendo a faixa do visível (Figura 4.13 a,b,c), do IVP (Figura 4.13 d) e do SWIR (Figura 4.13 e,f). A linha 1:1 dos gráficos representa a reflectância exatamente no ponto do hot spot (máxima reflectância). Em geral, o comportamento da reflectância em todas as faixas apresentou valores maiores na direção do retroespalhamento (lado superior da linha 1:1) e inferiores para o espalhamento frontal.

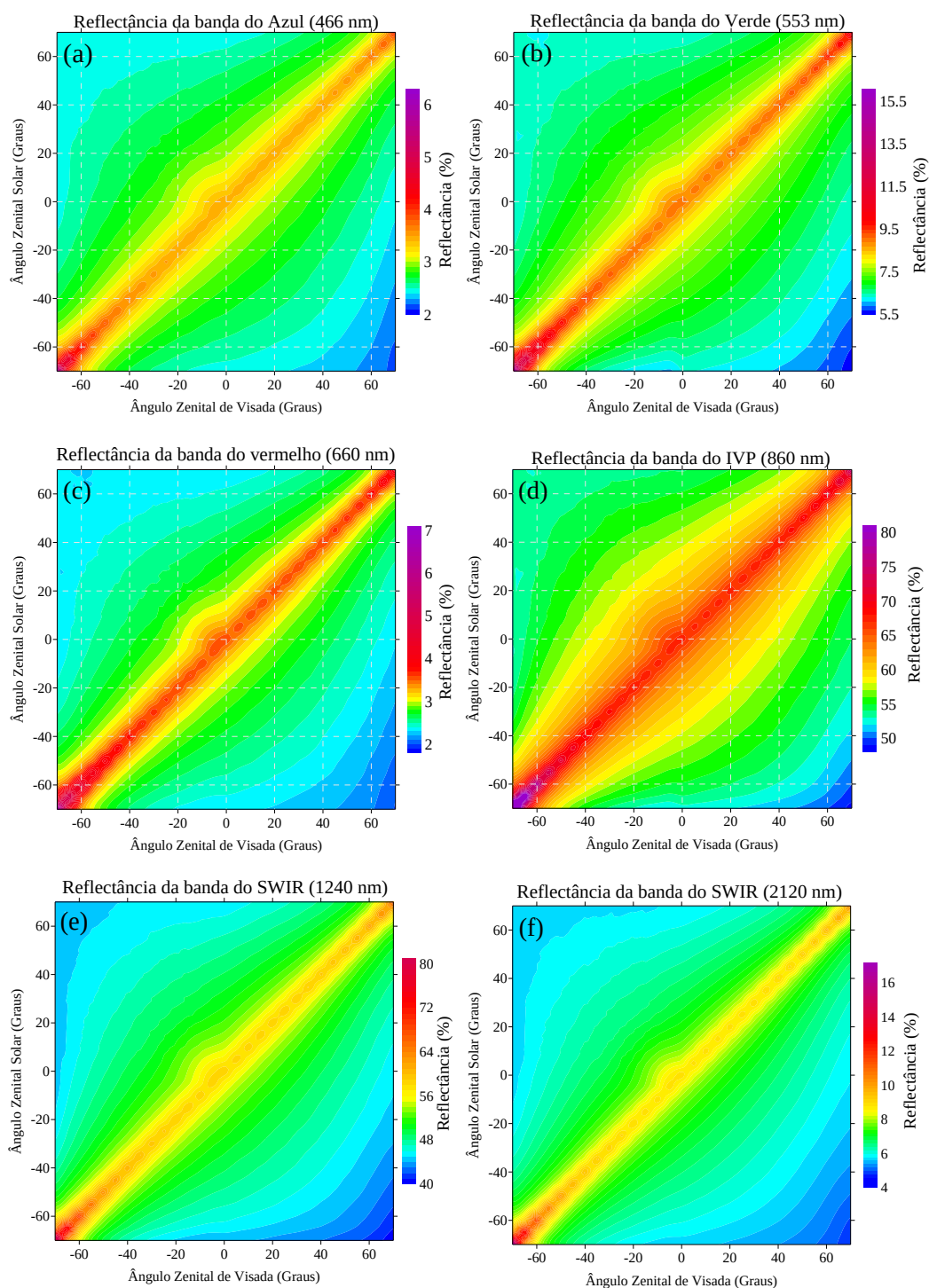


Figura 4.13 – Resultado das simulações no PROSAIL da reflectância simulada pelo PROSAIL para a banda do (a) azul, (b) verde, (c) vermelho, (d) IVP, (e) SWIR 1240 nm e (f) SWIR 2120 nm em função do AZV e do AZS. Simulações feitas com IAF de 5. As direções do espalhamento frontal (parte de baixo da linha 1:1) e do retroespalhamento (parte de cima da linha 1:1) estão indicadas na figura. O Ângulo Azimutal Relativo (AAR) foi mantido fixo em zero (plano principal de espalhamento).

4.1.5 Avaliação do efeito do ângulo zenital solar (AZS) sobre os espectros de reflectância simulados pelo PROSAIL

Mantendo o ângulo zenital de visada (AZV) constante em 30° foi possível avaliar o efeito do ângulo zenital solar ($AZS = -70^\circ$ a 70°) e do IAF sobre a reflectância. Para mostrar valores de reflectância em função do ANIF, os dados do efeito do AZS não foram normalizados para o nadir. Para as bandas do azul (Figura 4.14), do vermelho (Figura 4.15) e do IVP (Figura 4.16), os resultados das simulações mostram comportamento similar ao verificado na análise do AZV. Isso ocorreu porque os parâmetros AZV e AZS apenas foram invertidos no modelo. Desta forma, a discussão e as avaliações são similares às apresentadas na seção anterior. Em síntese, a reflectância nos comprimentos de onda do visível foi mais afetada pelo AZS do que a reflectância nas bandas do IVP e do SWIR. À medida que o IAF aumenta, a influência do AZS é reduzida, principalmente para a reflectância na banda do vermelho.

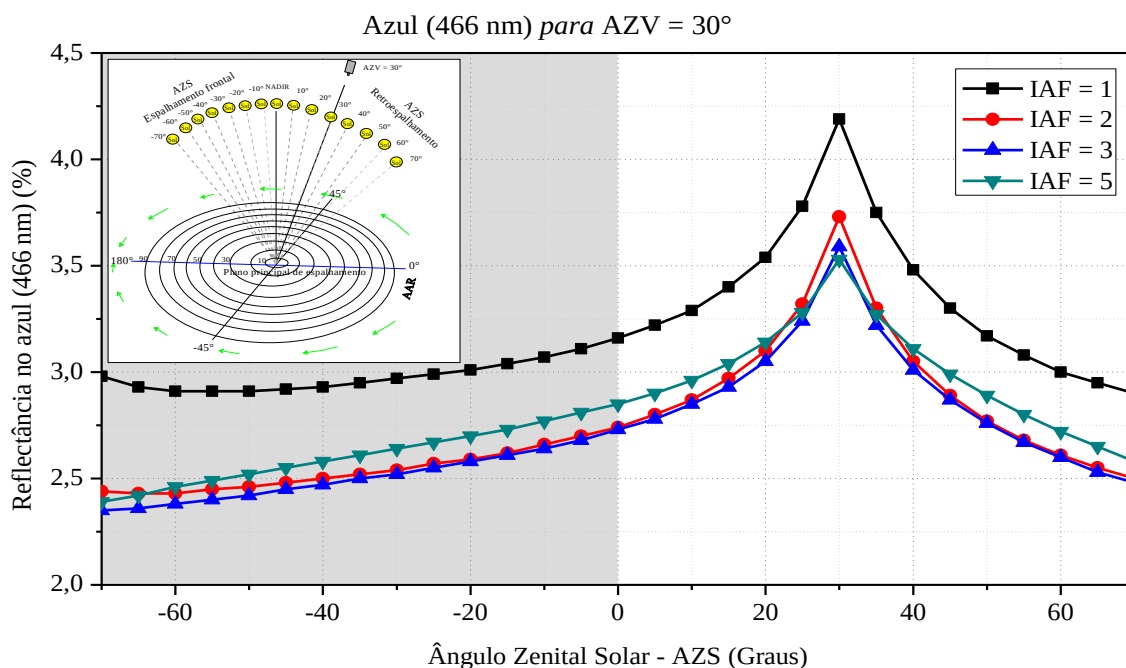


Figura 4.14 – Efeito do Ângulo Zenital Solar (AZS) sobre a reflectância simulada pelo PROSAIL da banda do azul (466 nm) em função do IAF. As direções do espalhamento frontal (em cinza e AZS negativos) e do retroespalhamento (branco e AZS positivos) estão indicadas. O Ângulo Azimutal Relativo (AAR) foi mantido fixo em zero (plano principal de espalhamento). O Ângulo Zenital de Visada foi mantido fixo em 30° .

Os resultados das simulações da reflectância em função do AZV e do AZS, apresentados na Figura 4.17, foram gerados para um IAF de 1. Para as bandas do visível (azul na Figura 4.17 a; vermelho na Figura 4.17 b) foram encontradas variações de alta e baixa reflectância para ângulos negativos (espalhamento frontal, com maior influência da sombra) e positivos (retroespalhamento, com dossel mais iluminado), respectivamente. Esse resultado está associado à maior influência da sombra sobre a reflectância das bandas do visível (onde predomina a absorção) ao contrário da reflectância do IVP, onde a transmitância da vegetação é mais alta (aproximadamente 50%) (LEBLON et al., 1996; APARICIO et al., 2004).

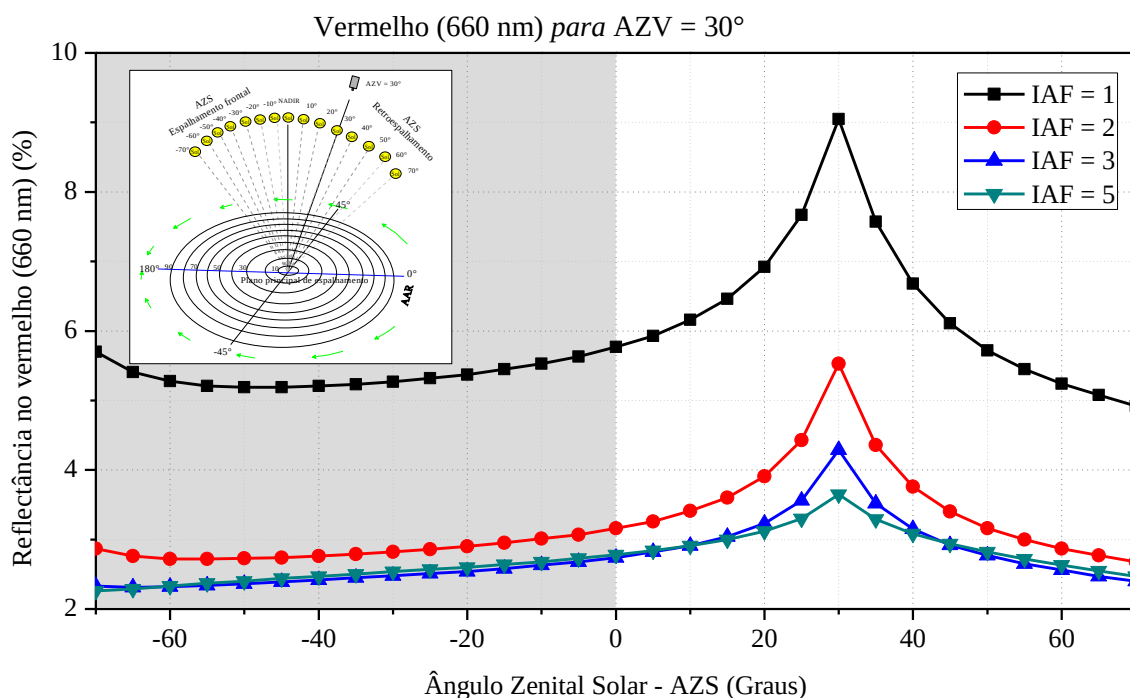


Figura 4.15 – Efeito do Ângulo Zenital Solar (AZS) sobre a reflectância simulada pelo PROSAIL da banda do vermelho (660 nm) em função do IAF. As direções do espalhamento frontal (em cinza e AZS negativos) e do retroespalhamento (branco e AZS positivos) estão indicadas na figura. O Ângulo Azimutal Relativo (AAR) foi mantido fixo em zero (plano principal de espalhamento). O Ângulo Zenital de Visada foi mantido fixo em 30°.

Em perspectiva, essa configuração mostra que a reflectância diminui quando o sensor está de frente para a fonte de iluminação (AAR = 180° na direção do plano principal de

espalhamento = espalhamento frontal). Assim, parece haver maior influência do substrato na direção do espalhamento frontal em relação à direção do retroespalhamento (AAR menor que 90°). Para os comprimentos de onda do IVP (Figura 4.17c) e do SWIR (Figura 4.17d), verificou-se grande similaridade com os resultados obtidos com simulações para um IAF de cinco (Figura 4.13).

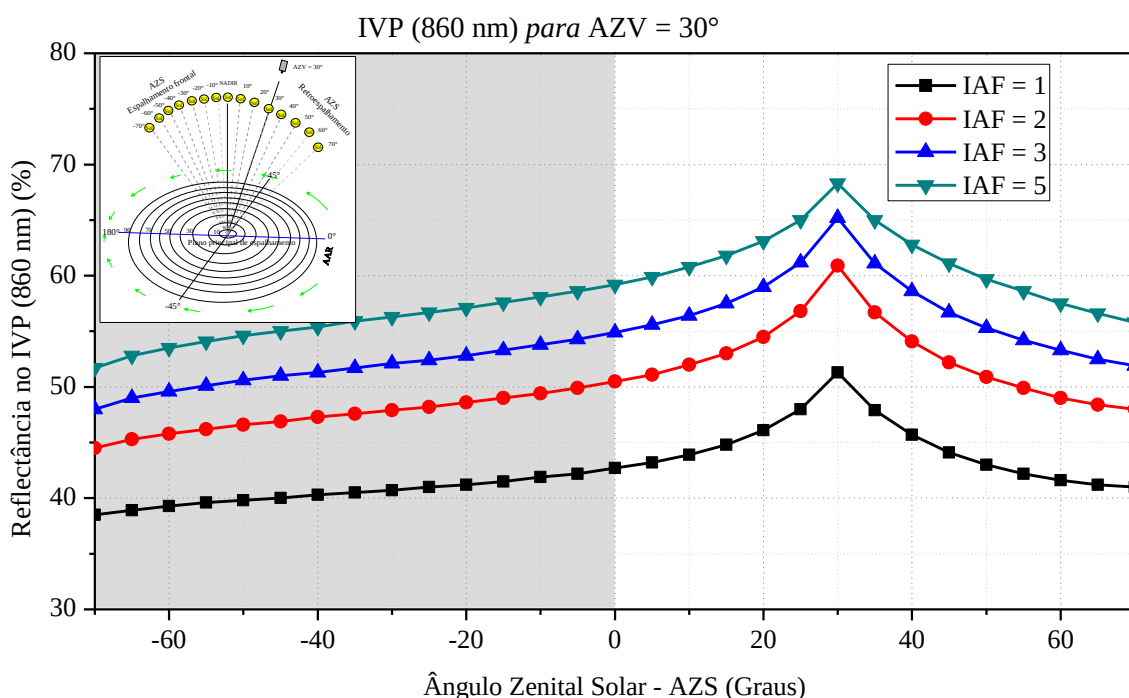


Figura 4.16 – Efeito do Ângulo Zenital Solar (AZS) sobre reflectância simulada pelo PROSAIL da banda do IVP (860 nm) em função do IAF. As direções do espalhamento frontal (em cinza e AZS negativos) e do retroespalhamento (branco e AZS positivos) estão indicadas na figura. O Ângulo Azimutal Relativo (AAR) foi mantido fixo em zero (plano principal de espalhamento). O Ângulo Zenital de Visada foi mantido fixo em 30°.

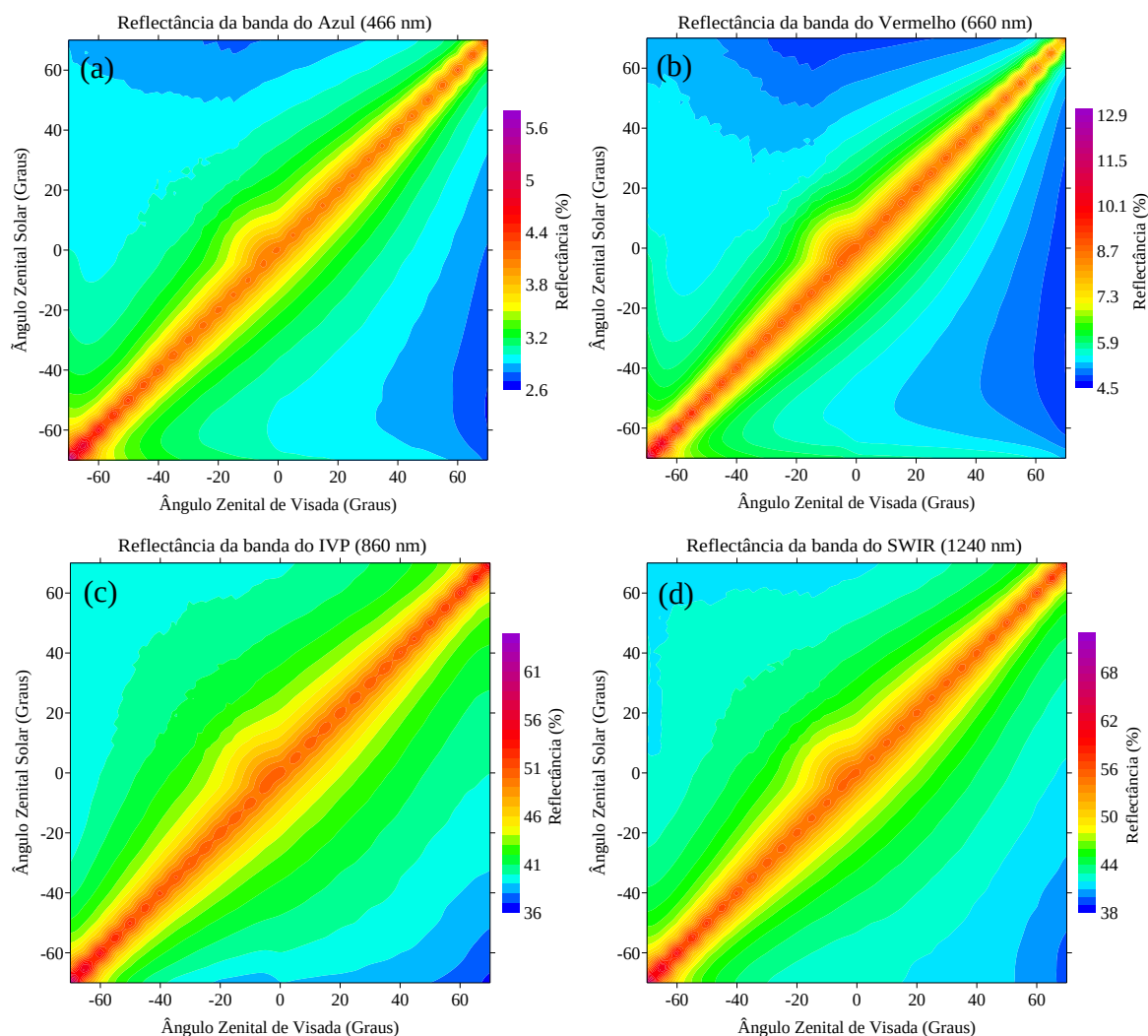


Figura 4.17 – Resultado das simulações no PROSAIL da reflectância simulada pelo PROSAIL para as bandas do (a) azul, (b) vermelho, (c) IVP e (d) SWIR 1240 nm em função do AZV e do AZS. Simulações feitas com IAF de 1. As direções do espalhamento frontal (parte de baixo da linha 1:1) e do retroespalhamento (parte de cima da linha 1:1) estão indicadas na figura. O Ângulo Azimutal Relativo (AAR) foi mantido fixo em zero (plano principal de espalhamento).

4.1.6 Efeito dos ângulos zenitais de visada e solar sobre os índices de vegetação

Após avaliar os efeitos da geometria de visada e de iluminação sobre os espectros de reflectância, pode-se discutir os resultados dos estudos com os índices de vegetação calculados a partir dos dados simulados com o PROSAIL. É preciso ressaltar que todos

os índices foram calculados com base em bandas estreitas (1 nm).

4.1.6.1 NDVI (Normalized Difference Vegetation Index)

A avaliação do efeito do AZV sobre o NDVI em função de diferentes valores de IAF e um AZS fixo (30°) com as simulações do PROSAIL mostrou que à medida que o IAF aumenta, os efeitos direcionais (retroespalhamento e espalhamento frontal) são reduzidos (Figura 4.18), em concordância com os resultados obtidos por Epiphanyo e Huete (1995) e Walter-Shea et al. (1997) com experimentos de campo e por Breunig et al. (2011) com base em imagens do sensor MODIS. Os resultados mostraram que o NDVI reduz os efeitos direcionais, contudo não os elimina (KIMES et al., 1984; APARICIO et al., 2004).

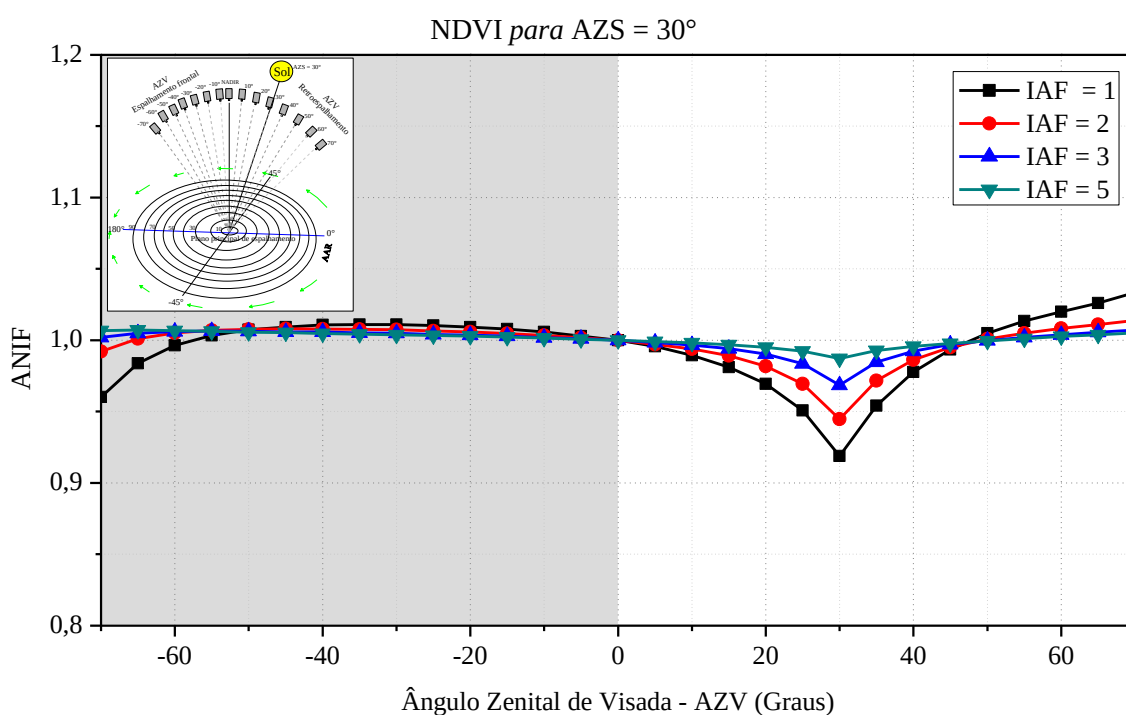


Figura 4.18 – Efeito do Ângulo Zenital de Visada (AZV) sobre o NDVI normalizado (ANIF) em função do IAF. As direções do espalhamento frontal (em cinza e AZV negativos) e do retroespalhamento (branco e AZV positivos) estão indicadas na figura. O Ângulo Azimutal Relativo (AAR) foi mantido fixo em zero (plano principal de espalhamento). O Ângulo Zenital Solar foi mantido fixo em 30°.

A combinação de todos os AZV com todos os AZS para um IAF de cinco mostrou que

os menores valores de NDVI tendem a ocorrer ao longo da linha/diagonal 1:1 (Figura 4.19) que corresponde ao ponto de máximo hot spot. Além disso, para um determinado ângulo, verificou-se que o NDVI na direção do espalhamento frontal (parte inferior da linha 1:1 na Figura 4.19) sempre apresentou valores mais elevados do que na direção do retroespalhamento (parte superior da linha 1:1). Esse fato está associado à formulação do índice que é mais sensível às variações na banda do vermelho do que da banda do IVP (LEBLON et al., 1996; APARICIO et al. 2004).

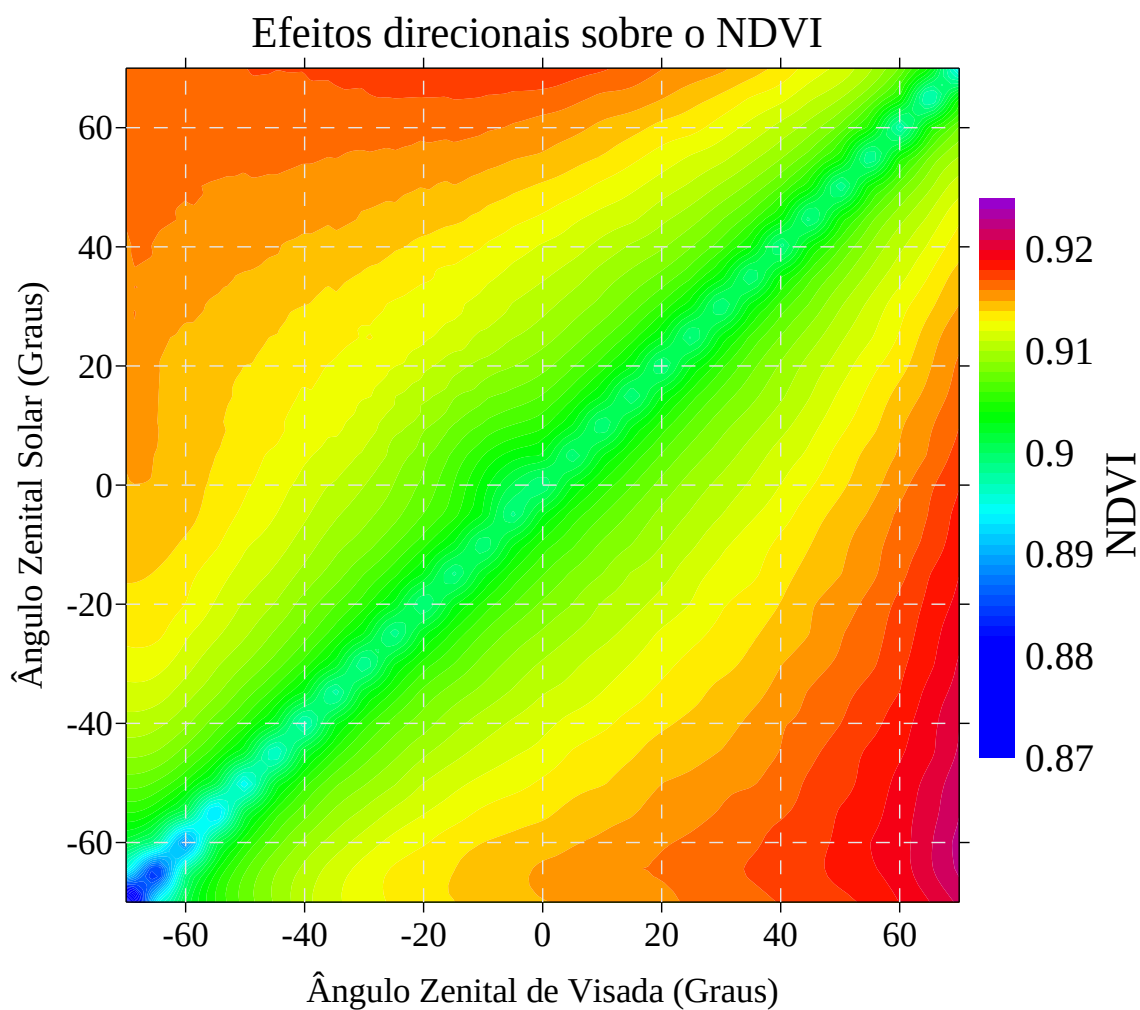


Figura 4.19 – Variação do NDVI em função do ângulo zenital de visada (AZV) e do ângulo zenital solar (AZS). As direções do espalhamento frontal (parte de baixo da linha 1:1) e do retroespalhamento (parte de cima da linha 1:1) estão indicadas na figura. O Ângulo Azimutal Relativo (AAR) foi mantido fixo em zero (plano principal de espalhamento). Avaliação feita com base num IAF de 5.

Em relação às variações de NDVI em função do AZS e do IAF (para um AZV fixo), os resultados foram os mesmos aos apresentados na Figura 4.18. Este resultado se justifica porque foi simulado um deslocamento de um dos componentes (Sol, AZS) e dos demais parâmetros mantidos fixos ($AZV = 30^\circ$). Este resultado se aplica às avaliações do EVI e outros índices de vegetação calculados a partir das simulações no PROSAIL. Assim, apenas a avaliação do AZV sobre os índices de vegetação será explorada.

4.1.6.2 EVI (Enhanced Vegetation Index)

Ao contrário dos resultados encontrados para o NDVI, as variações do EVI em função do AZV e do IAF (para um AZS fixo de 30°) mostraram que à medida que o IAF aumenta, os efeitos direcionais na direção do retroespalhamento, especialmente no ponto de hot spot, são ressaltados (Figura 4.20).

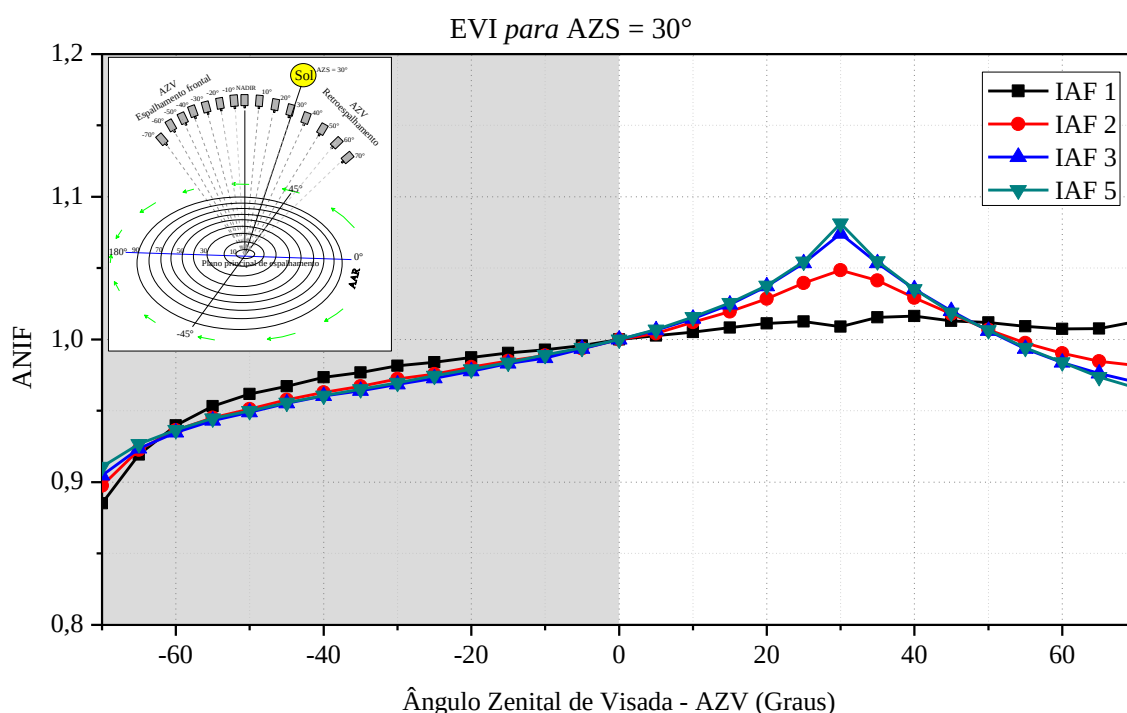


Figura 4.20 – Efeito do Ângulo Zenital de Visada (AZV) sobre o EVI normalizado (ANIF) em função do IAF. As direções do espalhamento frontal (em cinza e AZV negativos) e do retroespalhamento (branco e AZV positivos) estão indicadas na figura. O Ângulo Azimutal Relativo (AAR) foi mantido fixo em zero (plano principal de espalhamento). O Ângulo Zenital Solar foi mantido fixo em 30° .

Com a combinação de diferentes ângulos (AZV e AZS) foi possível verificar que para um IAF fixo (cinco, representando um dossel fechado), o EVI calculado para a direção do retroespalhamento (acima da linha 1:1 na Figura 4.21) sempre é superior ao EVI do ângulo oposto, na direção do espalhamento frontal (abaixo da linha 1:1 na Figura 4.21). Ao comparar a Figura 4.20 com Figura 4.12 e a Figura 4.21 com a Figura 4.13d, verifica-se que o EVI apresenta o mesmo comportamento da banda do IVP, quando submetido à análise de distintas configurações de iluminação/visada e distintos valores de IAF (dossel aberto ou fechado). As correlações entre EVI e a banda do IVP serão mais bem abordadas na seção 4.4

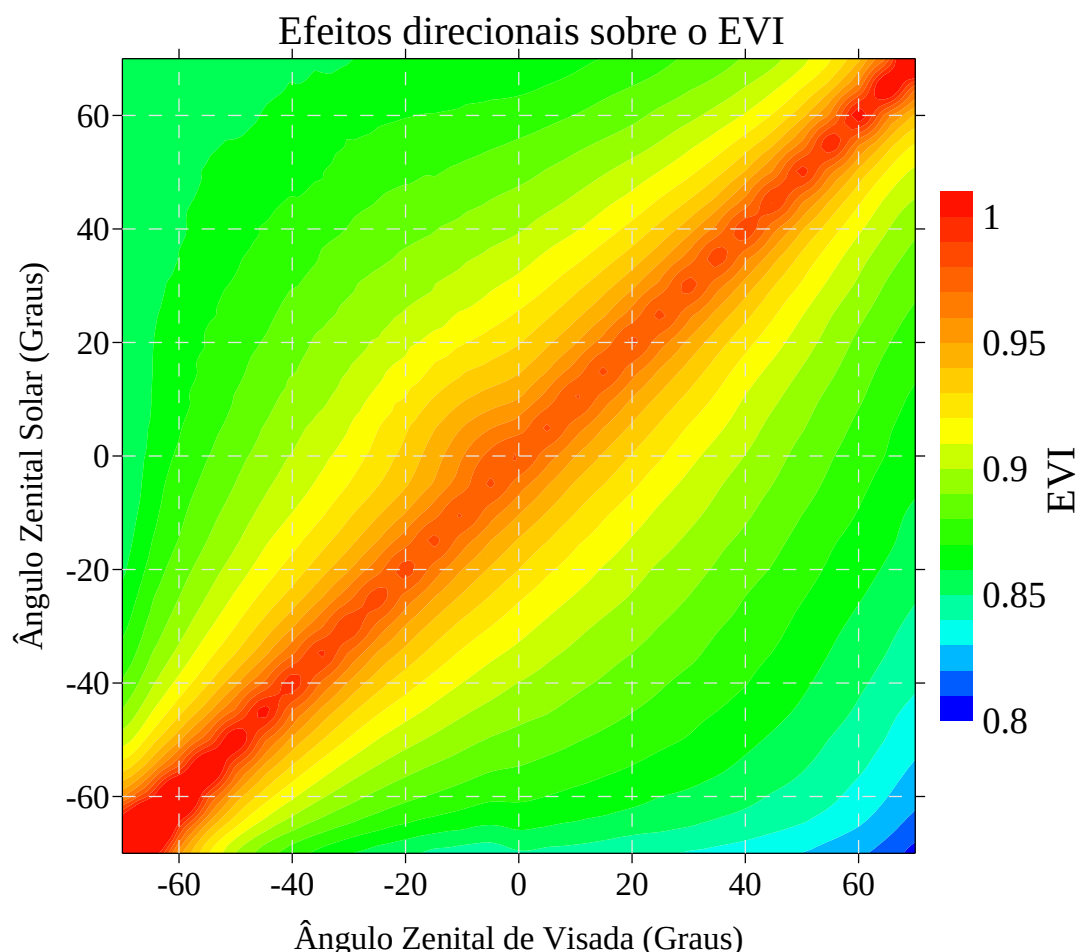


Figura 4.21 - Variação do EVI em função do ângulo zenital de visada (AZV) e do ângulo zenital solar (AZS). As direções do espalhamento frontal (parte de baixo da linha 1:1) e do retroespalhamento (parte de cima da linha 1:1) estão indicadas na figura. O Ângulo Azimutal Relativo (AAR) foi mantido fixo em zero (plano principal de espalhamento). Avaliação feita com base num IAF de 5.

4.1.6.3 NDWI (Normalized Difference Water Index)

O NDWI explora as feições de absorção da água e variações na estrutura do mesófilo esponjoso através da banda centrada em torno de 1240 nm. Por outro lado, o IVP reflete as variações na estrutura interna da folha e o conteúdo de matéria seca (GAO, 1996). Ceccato (2001) mostrou através de simulações com o PROSPECT que o NDWI é mais indicado para identificar variações no conteúdo de água do dossel, enquanto o NDVI, que explora as feições dos pigmentos de clorofila. À medida que o IAF aumenta, os efeitos direcionais sobre o NDWI são reduzidos (Figura 4.22). Devido à presença de valores negativos para o IAF 1 (Figura 4.22 a), a normalização teve os valores invertidos (Figura 4.22 b).

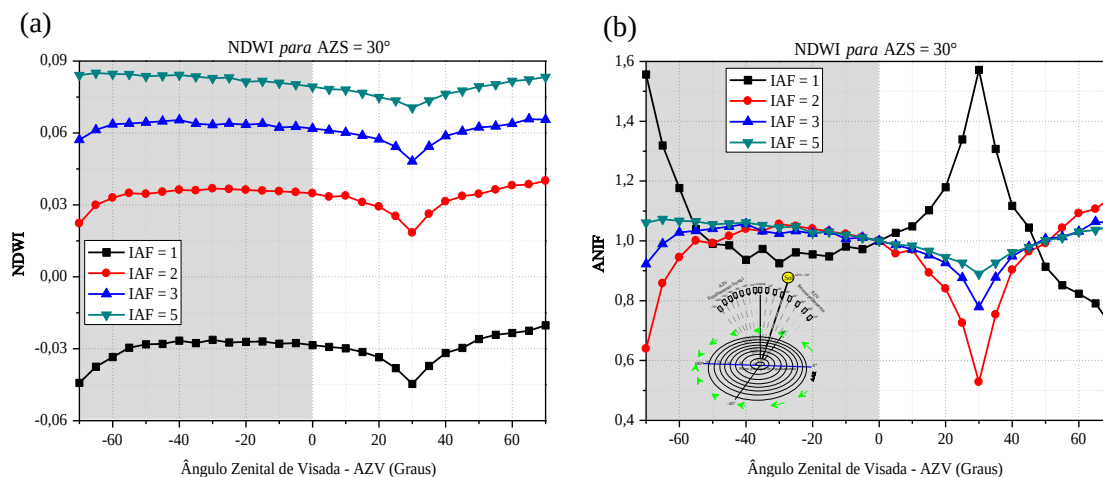


Figura 4.22 - Efeito do Ângulo Zenital de Visada (AZV) sobre o (a) NDWI e (b) NDWI normalizado (ANIF) em função do IAF. As direções do espalhamento frontal (em cinza e AZV negativos) e do retroespalhamento (branco e AZV positivos) estão indicadas na figura. O Ângulo Azimutal Relativo (AAR) foi mantido fixo em zero (plano principal de espalhamento). O Ângulo Zenital Solar foi mantido fixo em 30°.

Embora apresentasse valores absolutos distintos, as variações do NDWI em função do AZV e do AZS para um IAF de cinco (Figura 4.23) foram similares aos resultados obtidos com o NDVI. Os menores valores foram encontrados no ponto de hot spot. Além disso, os valores na direção do retroespalhamento sempre foram inferiores aos valores do NDWI na direção do espalhamento frontal, considerando um mesmo ângulo (Figura 4.23).

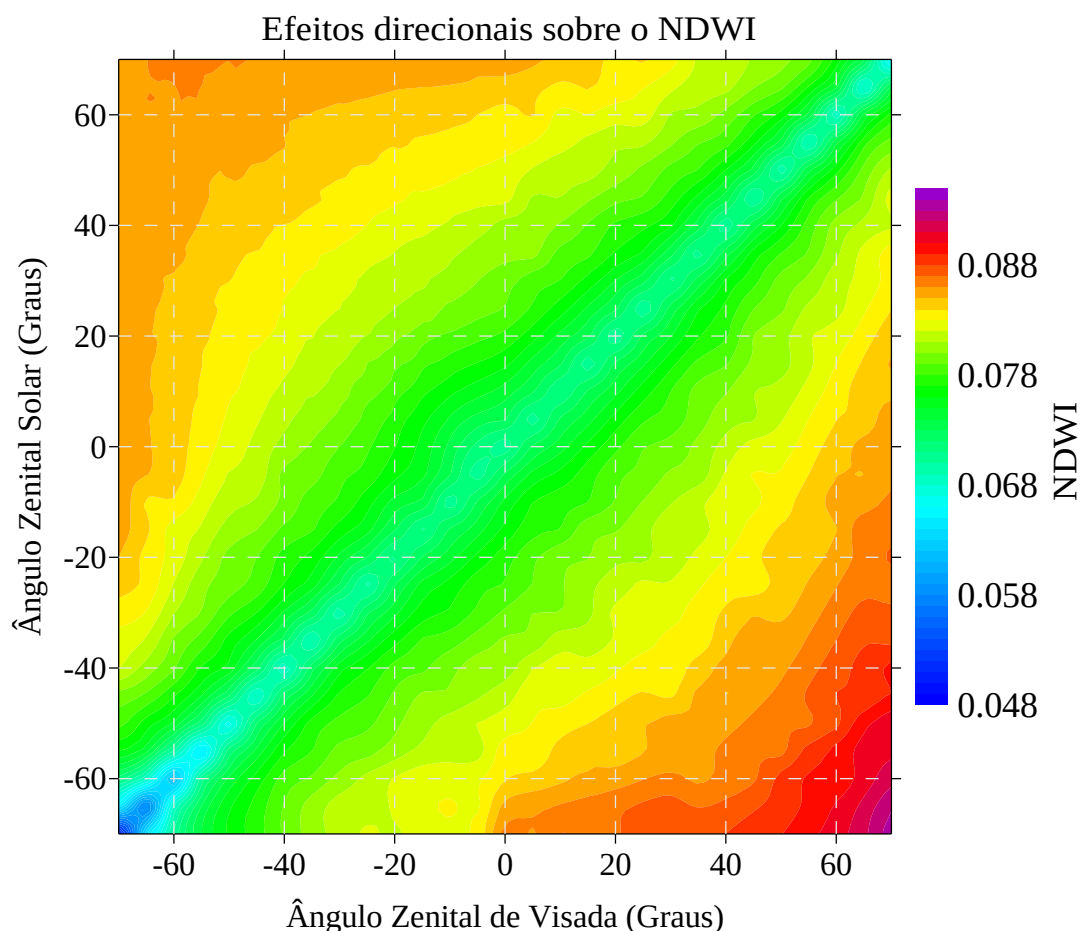


Figura 4.23 – Variação do NDWI em função do ângulo zenital de visada (AZV) e do ângulo zenital solar (AZS). As direções do espalhamento frontal (parte de baixo da linha 1:1) e do retroespalhamento (parte de cima da linha 1:1) estão indicadas na figura. O Ângulo Azimutal Relativo (AAR) foi mantido fixo em zero (plano principal de espalhamento). Avaliação feita com base num IAF de 5.

4.1.6.4 Outros índices de vegetação

Apesar de os diferentes índices de vegetação reduzirem determinados efeitos externos (sombra, atmosfera), em geral, a influência do ângulo zenital de visada (AZV) e do ângulo zenital solar (AZS) não é removida com o cálculo desses índices (Figura 4.24). Apenas o GNDVI (Figura 4.24 a) apresentou menor dependência dos efeitos direcionais de forma similar ao NDVI. O EVI-2 (Figura 4.24 b) e as modificações no NDWI (Figura 4.24 c; Figura 4.24 d) não apresentaram resultados melhores em relação aos índices originais (EVI e NDWI, respectivamente).

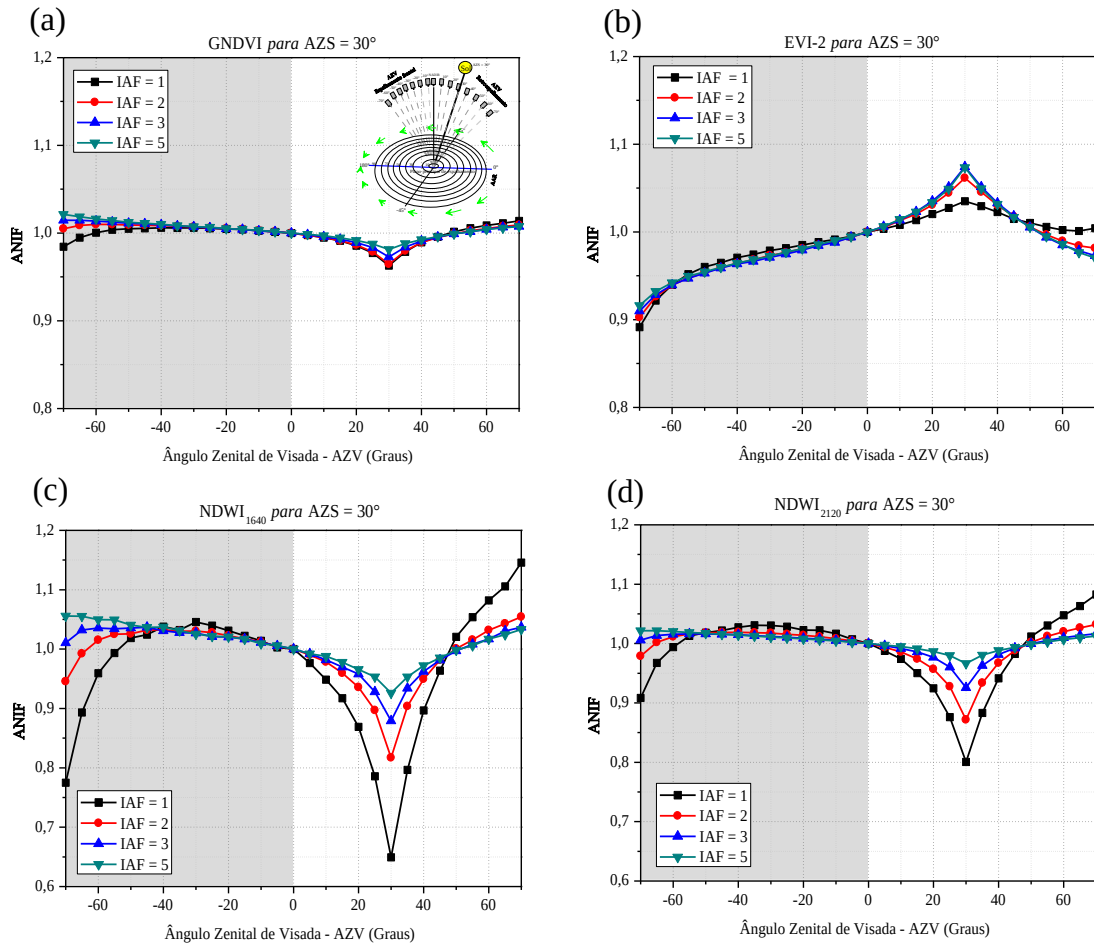


Figura 4.24 – Efeito do Ângulo Zenital de Visada (AZV) sobre a normalização do (a) GNDVI (Gitelson et al., 1996), (b) EVI-2 (Jiang et al., 2008), (c) $NDWI_{1640}$ e (d) $NDWI_{2120}$, em função do IAF. As direções do espalhamento frontal (em cinza e AZV negativos) e do retroespalhamento (branco e AZV positivos) estão indicadas na figura. O Ângulo Azimutal Relativo (AAR) foi mantido fixo em zero (plano principal de espalhamento). O Ângulo Zenital Solar (AZS) foi mantido fixo em 30° .

4.1.7 Comparação entre os espectros simulados e espectros medidos pelo MODIS

A simulação da reflectância da variedade Perdiz com o PROSAIL para os anos-safra 2004-2005 e 2005-2006 e em distintos estádios de fenológicos da soja mostrou que a magnitude dos efeitos direcionais e geométricos sobre a reflectância simulada pelo PROSAIL é siminalar aos dados observados pelo MODIS. Quando o modelo foi

ajustado para um IAF de 0,3 a forma do espectro de reflectância simulado foi bastante semelhante aos dados MODIS, contudo superior. Isto ocorreu, possivelmente devido às diferenças entre o IAF real (valor desconhecido) e o valor utilizado na simulação (IAF = 0,3) (Figura 4.25).

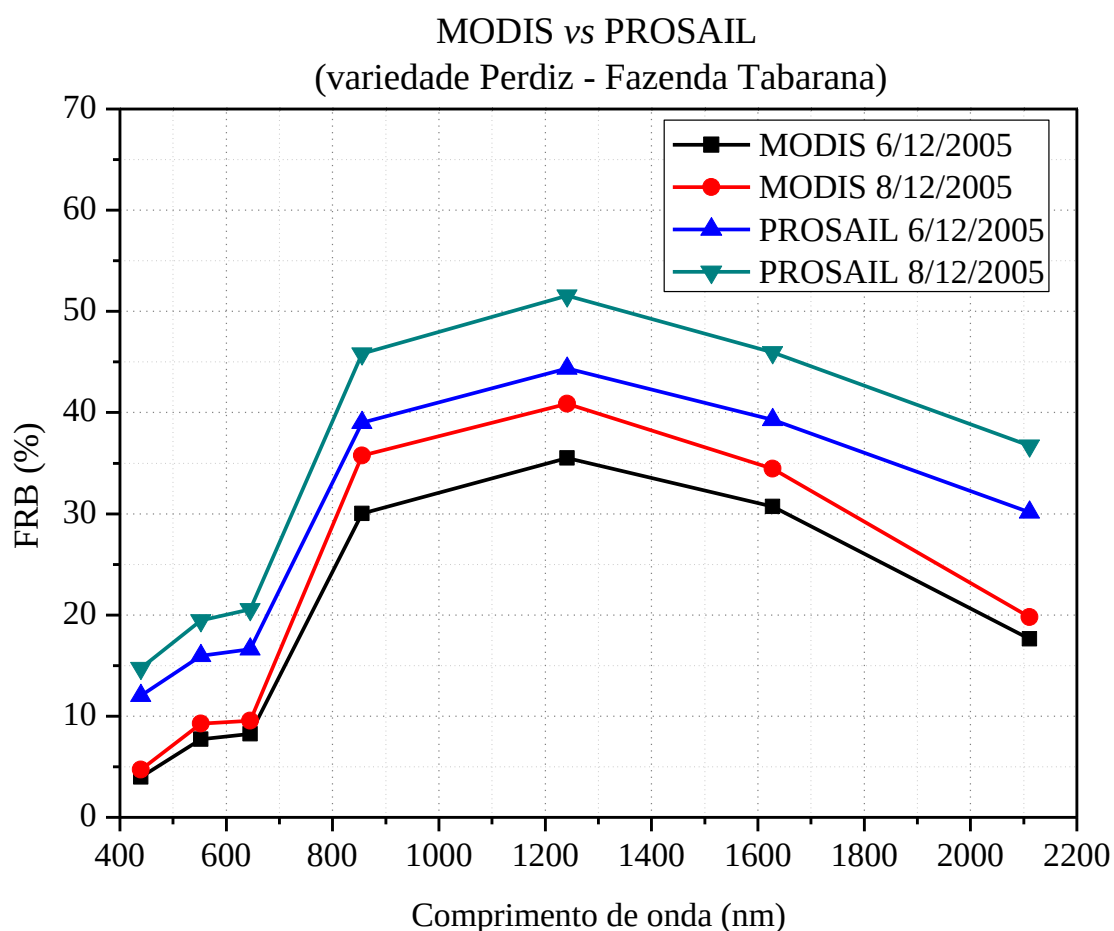


Figura 4.25 – Efeito da direção de espalhamento sobre os espectros de reflectância MODIS reais do dia 6 (espalhamento frontal) e 8 de dezembro (retroespalhamento) de 2005. Comparação entre os dados reais MODIS e simulados pelo PROSAIL para a variedade Perdiz. A simulação pelo PROSAIL utilizou os mesmos parâmetros geométricos associados à aquisição das imagens MODIS. IAF de aproximadamente 0,3. A reamostragem utilizou as funções filtro do MODIS.

Tanto para um IAF de 3 (Figura 4.26), quanto para um IAF de 5 (Figura 4.27), a intensidade dos efeitos direcionais sobre a reflectância simulada pelo PROSAIL foi bem ajustada na direção do retroespalhamento (um pouco abaixo do MODIS). Na direção do espalhamento frontal o valor de reflectância simulado pelo PROSAIL sempre foi

superior ao dado observado pelo MODIS. O resultado pode ser consequência dos ajustes dos parâmetros biofísicos e geométricos no modelo PROSAIL ou mesmo em função da escala de estudo, dos efeitos atmosféricos e de vizinhança associados aos dados observados do MODIS. Em geral, o PROSAIL subestimou os efeitos direcionais, principalmente na direção do espalhamento frontal, nas regiões espectrais do azul e do verde.

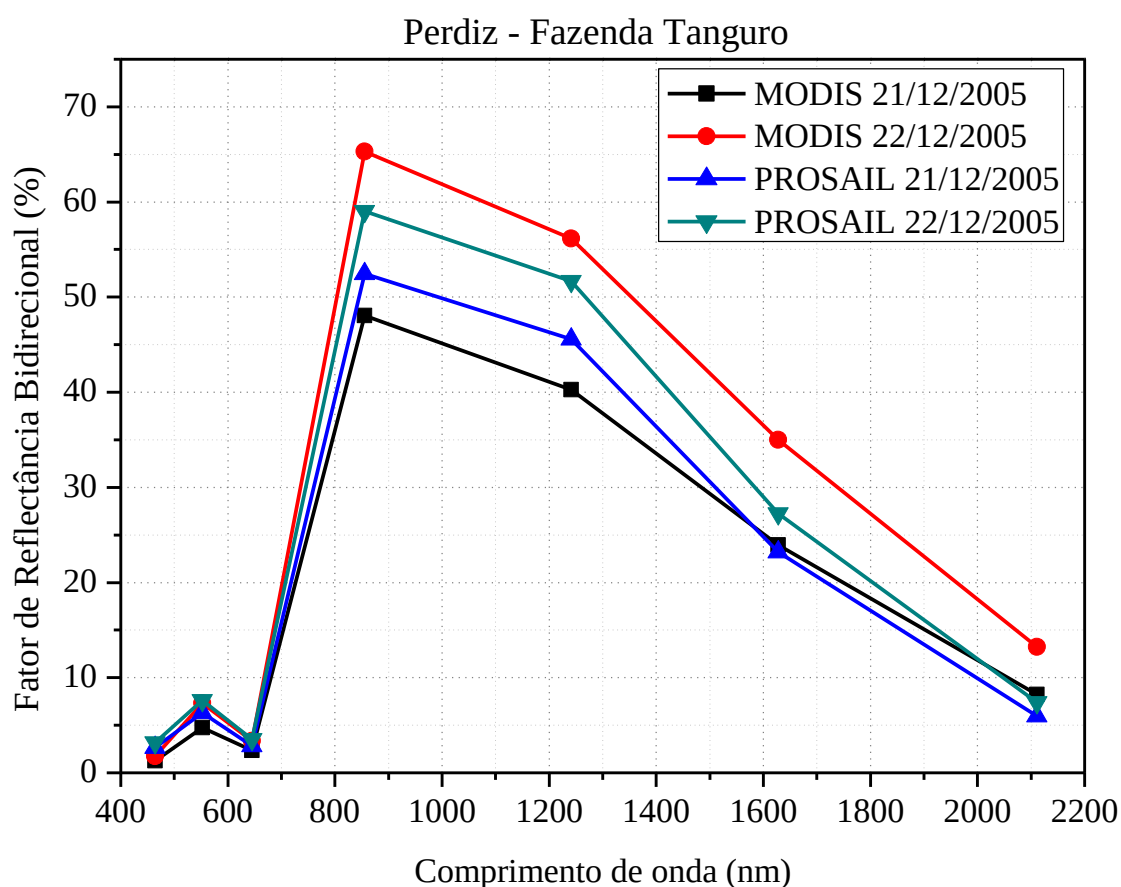


Figura 4.26 - Efeito da direção de espalhamento sobre os espectros de reflectância MODIS reais do dia 21 (espalhamento frontal) e 22 (retroespalhamento) de dezembro de 2005. Comparação entre os dados reais MODIS e simulados pelo PROSAIL para a variedade Perdiz. A simulação pelo PROSAIL utilizou os mesmos parâmetros geométricos associados à aquisição das imagens MODIS. IAF de aproximadamente 3. A reamostragem utilizou as funções filtro do MODIS.

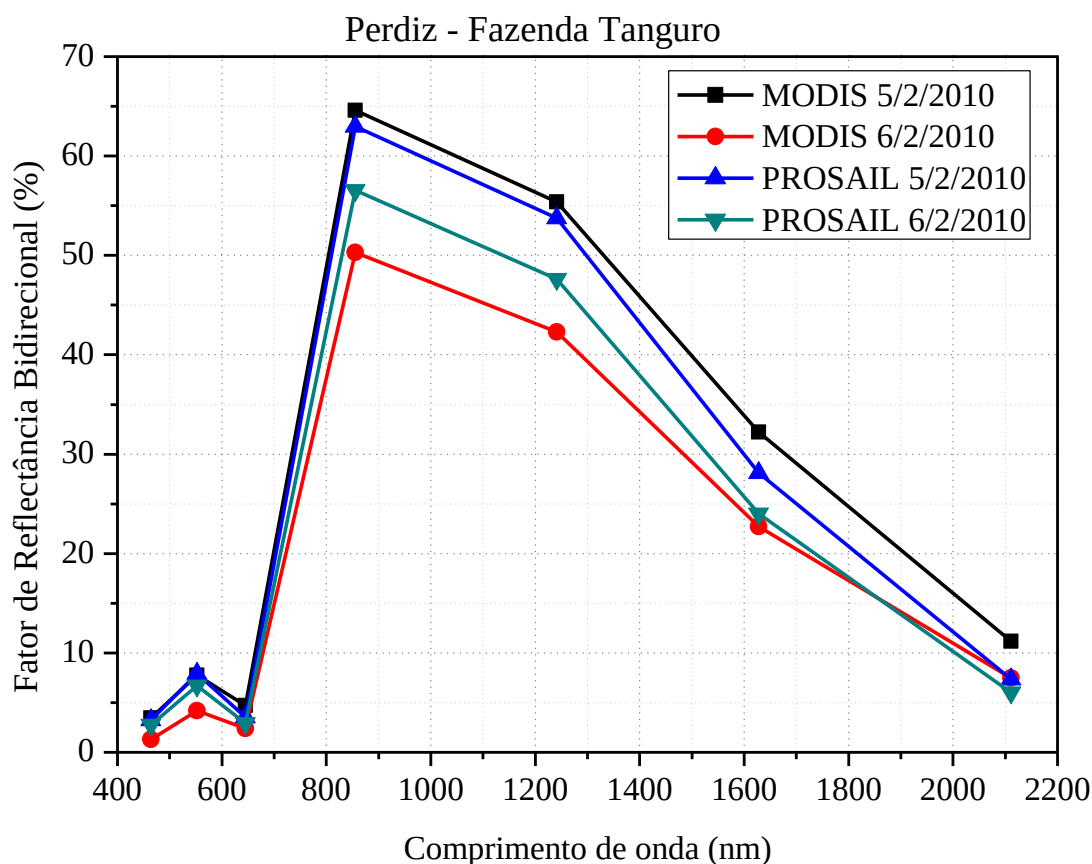


Figura 4.27 - Efeito da direção de espalhamento sobre os espectros de reflectância MODIS reais do dia 5 (retroespalhamento) e 6 (espalhamento frontal) de fevereiro de 2005. Comparação entre os dados reais MODIS e simulados pelo PROSAIL para a variedade Perdiz. A simulação pelo PROSAIL utilizou os mesmos parâmetros geométricos associados à aquisição das imagens MODIS. IAF de aproximadamente 5. A reamostragem utilizou as funções filtro do MODIS.

4.2 Avaliação dos efeitos direcionais sobre a reflectância e índices de vegetação com dados do sensor MODIS

4.2.1 Impacto dos efeitos direcionais sobre a reflectância diária do sensor MODIS/Terra

O caráter anisotrópico dos dosséis de soja foi evidenciado pelas grandes diferenças na reflectância diária MODIS (500 m), para todas as bandas e estádios de desenvolvimento da soja. Os espectros de reflectância obtidos nas direções do espalhamento frontal e

retroespalhamento, referentes às variedades Perdiz (Figura 4.28) e Tabarana (Figura 4.29), mostraram que na direção do retroespalhamento (com predominância de dossel iluminado visto pelo sensor) os valores de reflectância tendem a apresentar valores mais elevados em relação aos espectros derivados de imagens do espalhamento frontal (predominância do dossel sombreado visto pelo sensor).

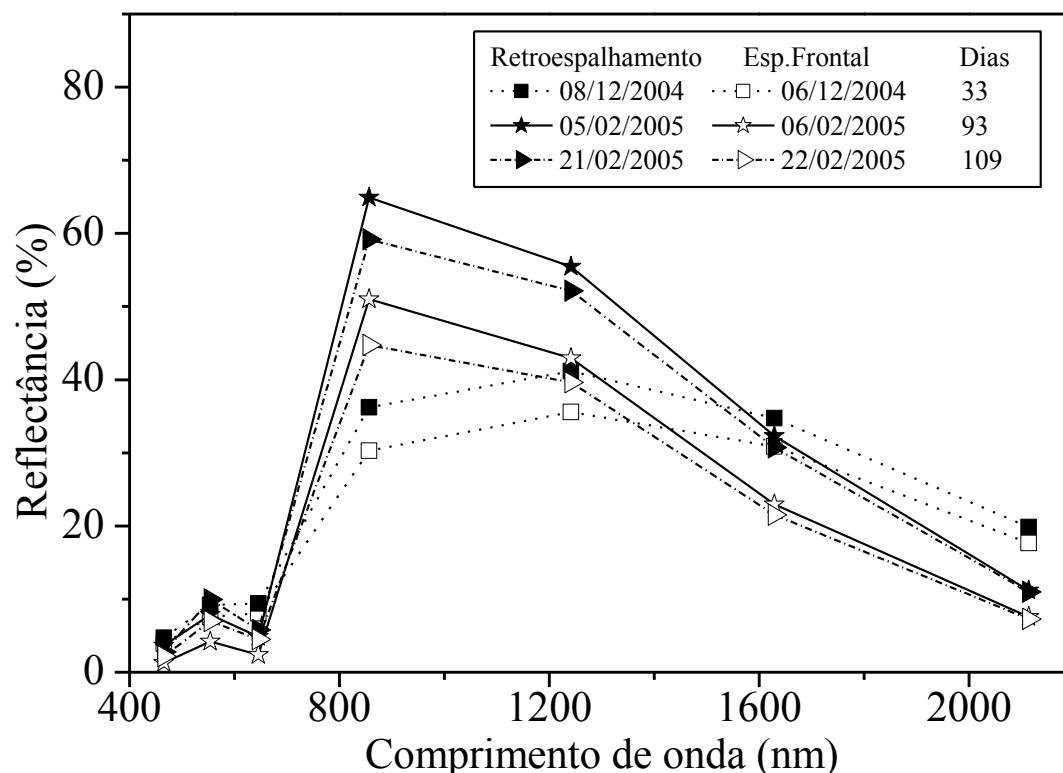


Figura 4.28 – Espectro de reflectância MODIS da variedade de soja Perdiz, cultivada na fazenda Tanguro, no ano-safra 2004-2005. Os dias após o plantio e a direção do espalhamento estão indicados. Os símbolos se referem ao posicionamento do comprimento de onda central das bandas do MODIS.

Para a variedade Tabarana, as diferenças da reflectância atingiram 20% aos 55 dias após o plantio da variedade para a faixa do IVP para ângulos de visada de 50° (15 e 16 de janeiro de 2006; Tabela 3.5). Essas diferenças atribuídas aos efeitos direcionais estão consistentes com os resultados obtidos por Galvão et al. (2009), utilizando dados fora do nadir do sensor hiperespectral Hyperion adquiridos sobre a fazenda Tanguro.

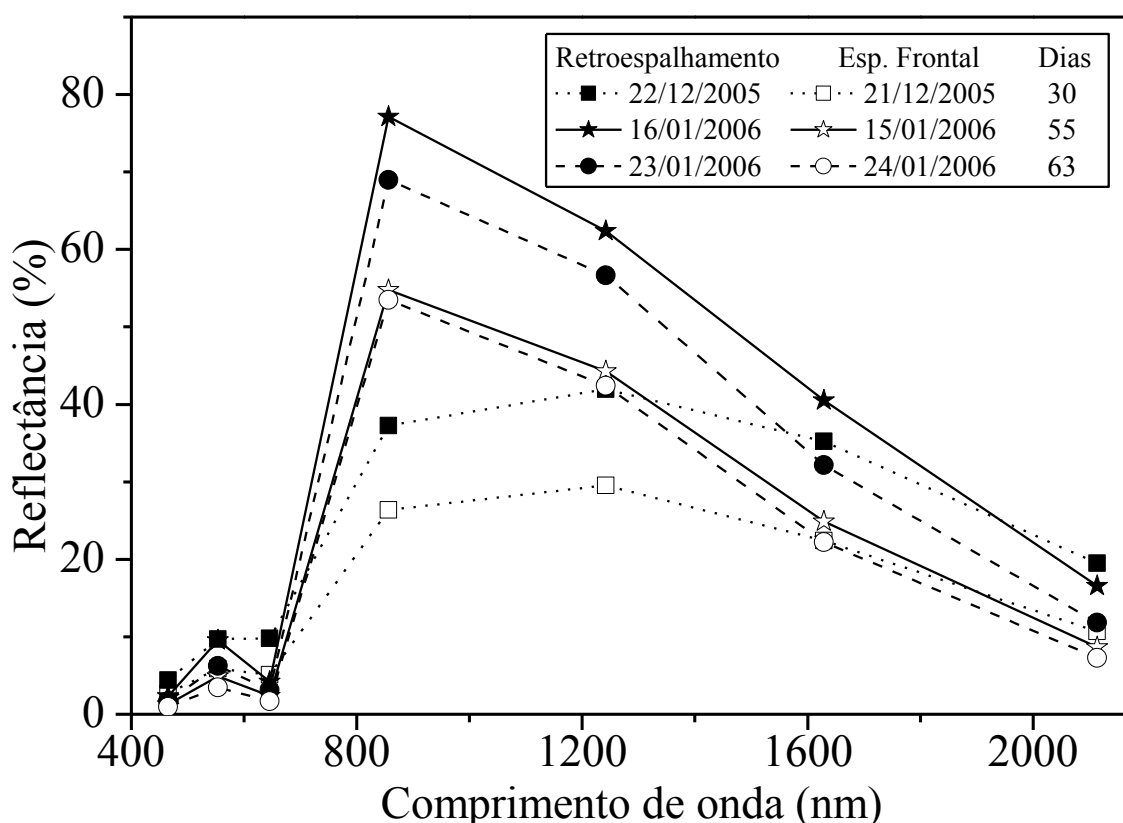


Figura 4.29 - Espectro de reflectância MODIS da variedade de soja Tabarana, cultivada na fazenda Alvorada, no ano-safra 2005-2006. Os dias após o plantio e a direção do espalhamento estão indicados. Os símbolos se referem ao posicionamento do comprimento de onda central das bandas do MODIS.

Os efeitos direcionais também foram claramente evidenciados para o ano-safra 2005-2006 através do gráfico de espalhamento da reflectância de superfície (MODIS 250 m) entre a banda do vermelho e do IVP (Figura 4.30). As relações não lineares com pequenas diferenças do coeficiente de determinação (R^2) produziram dois distintos agrupamentos para os dados derivados do retroespalhamento (maior reflectância – cor azul) e do espalhamento frontal (menor reflectância - cor vermelha).

As diferenças da reflectância obtidas de ambas as direções foram menores poucos dias após o plantio (com predomínio de solo exposto), apresentaram um aumento com o desenvolvimento fenológico das variedades de soja (círculo com IAF baixo na Figura 4.30) e voltaram a diminuir à medida que o dossel da soja fechou completamente (retângulo com IAF alto). Este comportamento também foi observado para gráficos de espalhamento entre o visível, IVP e SWIR do MODIS, de forma a confirmar as

significativas variações da reflectância associadas à geometria de visada, dentro da região espectral estudada (WALTER-SHEA et al., 1997).

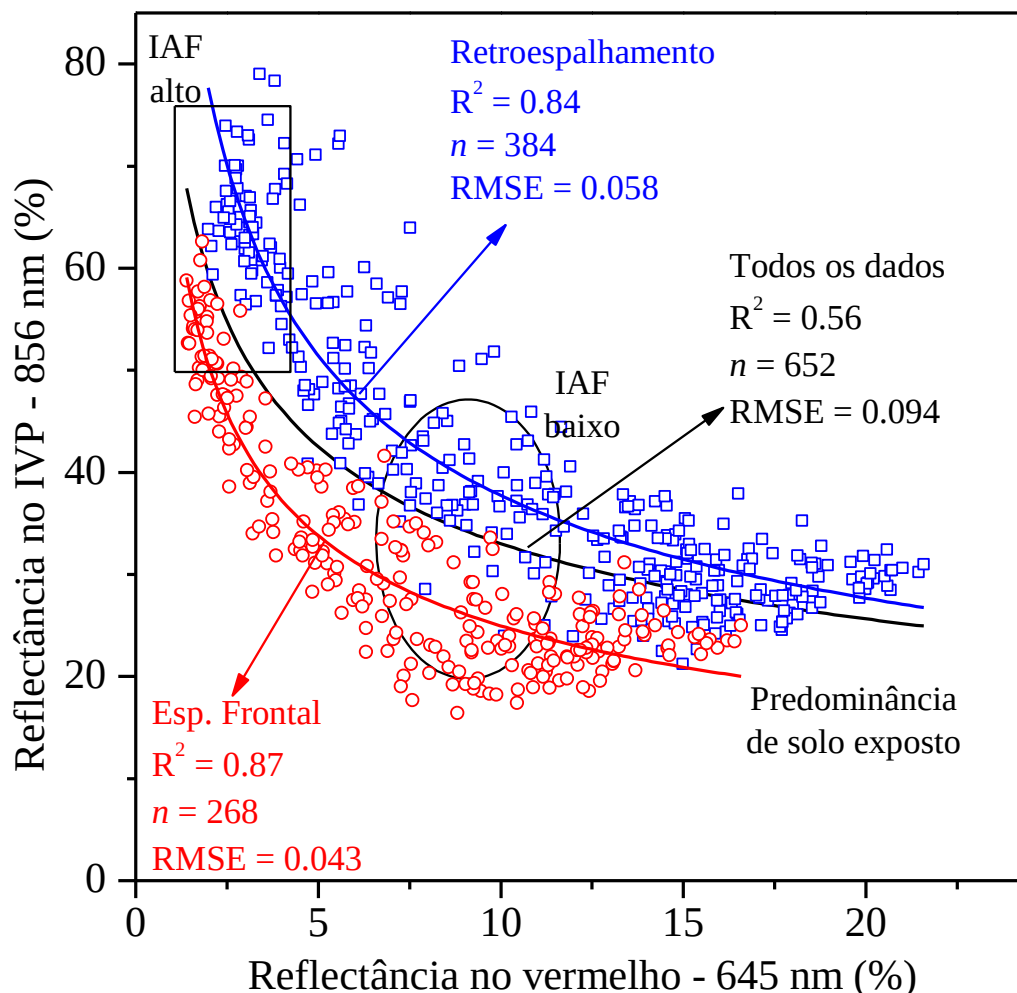


Figura 4.30 - Relação entre os valores de reflectância MODIS da banda do vermelho e do IVP, extraídos de 42 imagens de MODIS 250 m compreendendo todas as fazendas e ângulos de visada do ano-safra de 2005-2006.

As variações da reflectância em estádios fenológicos consecutivos foram menores do que as variações resultantes do ângulo zenital de visada do MODIS, considerando a variedade Perdiz. De 21 de dezembro de 2005 (onde a soja tinha aproximadamente 42 dias) até 24 de janeiro de 2006 (aos 76 dias após o plantio e com o dossel fechado), a variedade Perdiz apresentou diferenças de até 4 % na faixa espectral do IVP (banda 2 do MODIS) devido a diferenças de estágio fenológico (Figura 4.31). Por outro lado, essas diferenças aumentaram em até 20 % quando a mesma variedade foi imageada pelo MODIS em um mesmo estágio fenológico, mas com a direção dos ângulos zenitais de

visada opostos: retroespalhamento (42° em 23 de janeiro de 2006) e espalhamento frontal (-44° em 24 de janeiro de 2006) (Apêndice B).

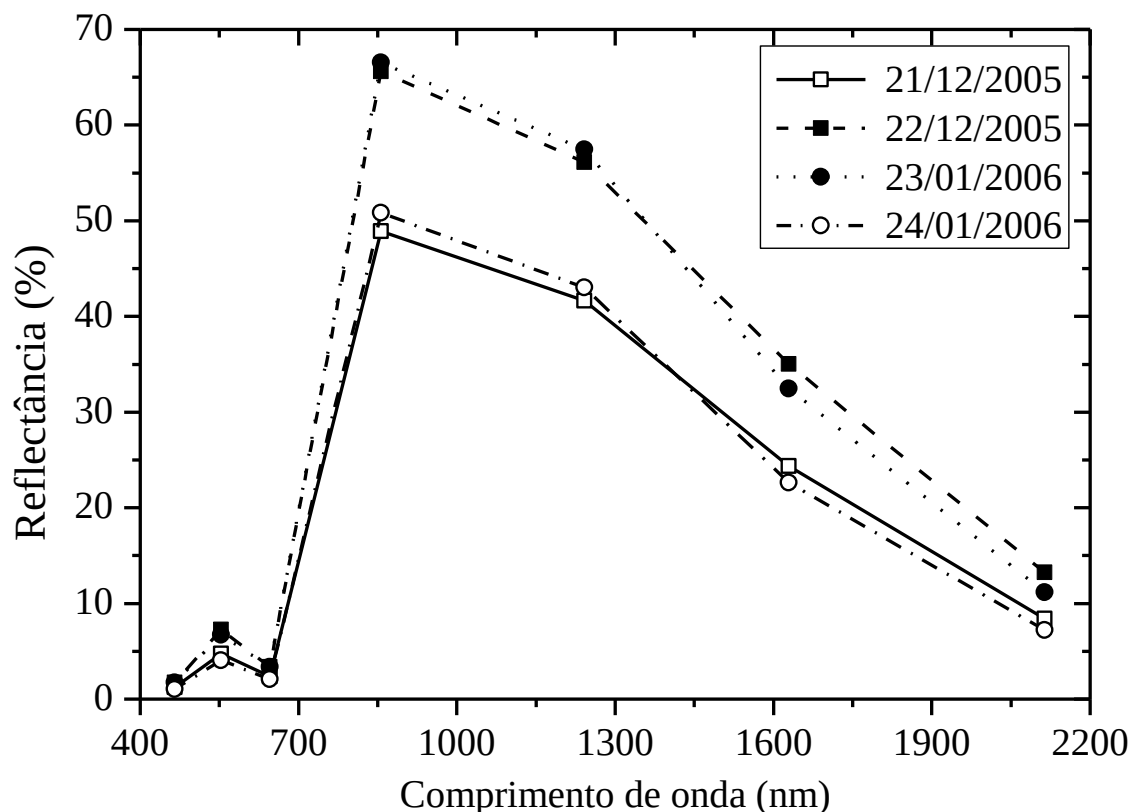


Figura 4.31 - Média da reflectância MODIS da variedade Perdiz em dois estágios de desenvolvimento do ano-safra 2005-2006. Símbolos fechados representam a direção do retroespalhamento e símbolos abertos representam a direção do espalhamento frontal. Em dezembro a soja estava com 42 dias e em janeiro com 76 dias após o plantio.

Uma avaliação mais detalhada mostrou que mesmo aos 42 o dossel da variedade Perdiz não apresentou grandes diferenças em termos de fechamento do dossel, tendo em vista, que em ambas as datas, o NDVI foi superior a 0,90. O contrário foi verificado para a variedade de soja Monsoy 9010 (Figura 4.32), onde as diferenças fenológicas foram bastante claras. A variedade Monsoy 9010 apresentou diferenças da ordem de 25% em função do estágio fenológico e de aproximadamente 15% em função dos efeitos direcionais, considerando a banda do IVP.

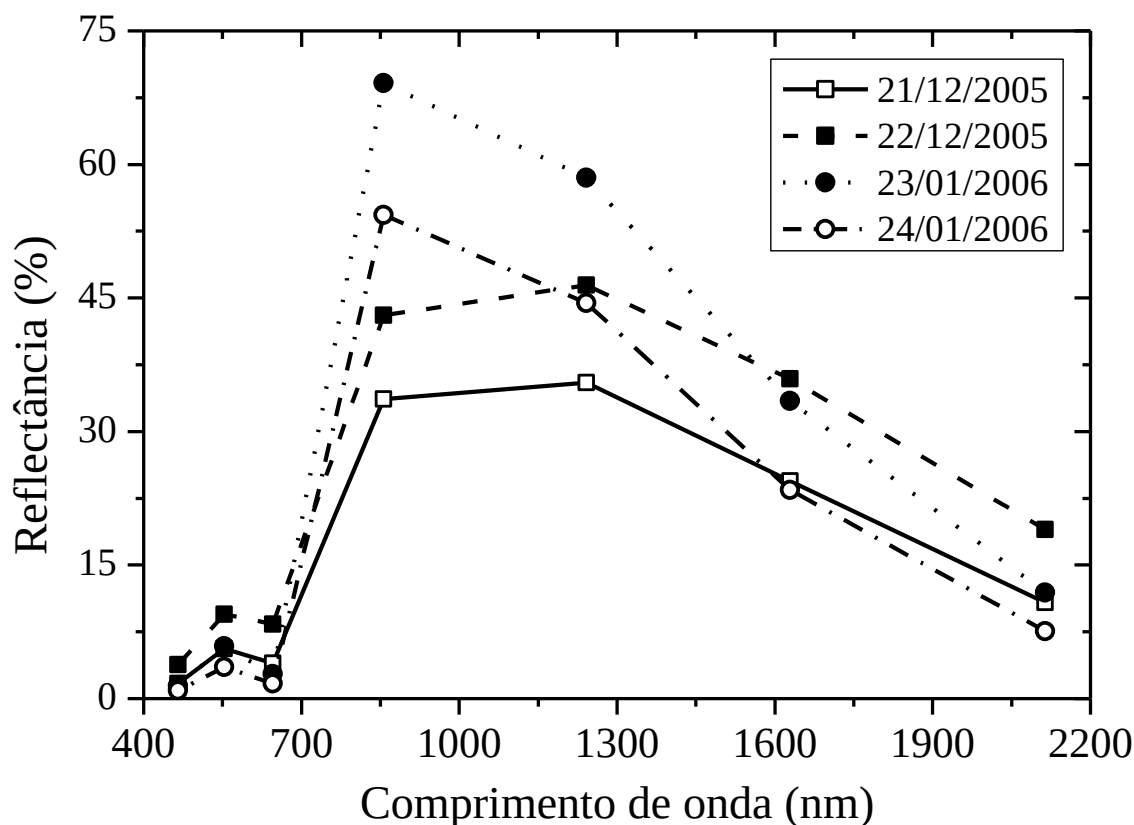


Figura 4.32 - Média da reflectância MODIS da variedade Monsoy 9010 em dois estádios de desenvolvimento do ano-safra 2005-2006. Símbolos fechados representam a direção do retroespalhamento e símbolos abertos representam a direção do espalhamento frontal. Em dezembro a soja estava com 42 dias e em janeiro com 76 dias após o plantio.

Conforme visto anteriormente, a reflectância na direção do retroespalhamento sempre foi superior à reflectância na direção do espalhamento frontal para todas as bandas do MODIS (banda 1 a 7) devido à maior presença de componentes iluminados do dossel no campo de visada do sensor. Apesar de a magnitude dos ângulos zenitais de visada apresentados na Tabela 3.7 ser distinta, a reflectância na banda do vermelho (Figura 4.33) e do IVP (Figura 4.34) foi maior na direção do retroespalhamento ao longo de todo o ciclo fenológico da soja nos dois anos safra, inclusive no período de plantio (predomínio de solo exposto).

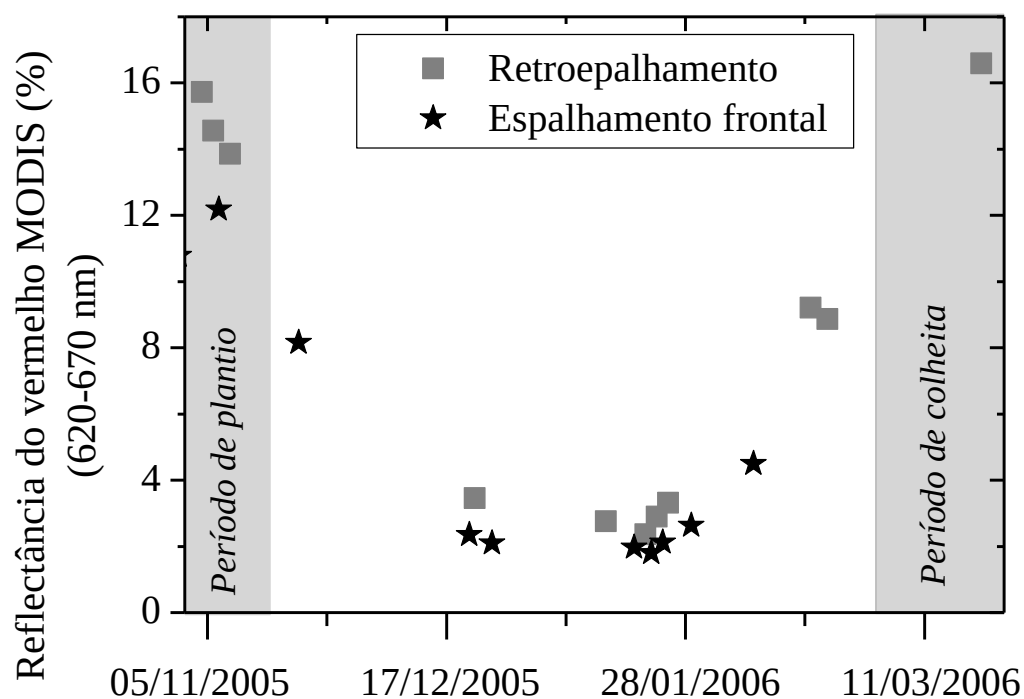


Figura 4.33 – Variação da reflectância MODIS da banda do vermelho em função do desenvolvimento da variedade Perdiz e em função da geometria de visada do MODIS.

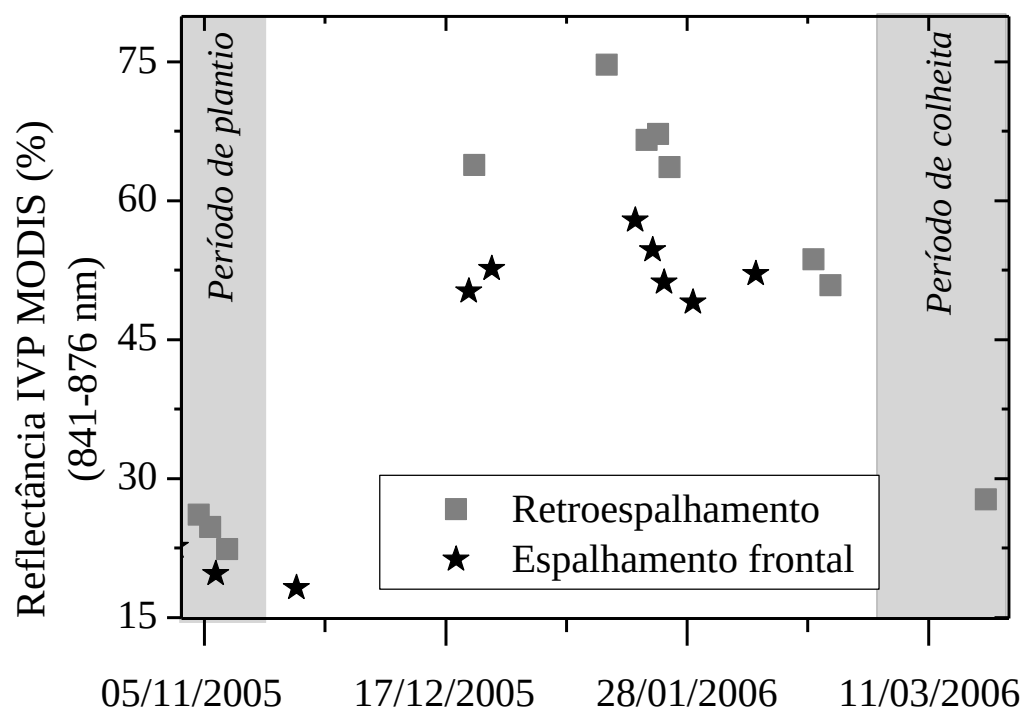


Figura 4.34 - Variação da reflectância MODIS da banda do IVP em função dos desenvolvimento da variedade Perdiz e em função da geometria de visada do MODIS.

A análise do NDVI em função das variedades de soja, além de maiores valores para a direção do espalhamento frontal, também mostrou uma maior amplitude à medida que as variedades de soja se desenvolveram, especialmente a variedade Monsoy 9010 (Figura 4.35). Esta variedade foi imageada pelo MODIS em estádios fenológicos iniciais quando comparada com as demais variedades. Em concordância com os estudos de campo de Epiphanyo e Huete (1995) e Walther-Shea et al. (1997), os resultados apresentados na Figura 4.35 mostraram que os efeitos direcionais sobre o NDVI foram mais intensos em condições de dossel incompleto (dezembro de 2005) e foram reduzidos quando o dossel fechou (janeiro de 2006). Resultado similar foi encontrado com as simulações com o modelo de transferência radiativa considerando diferentes IAF (Figura 4.19). Os outros índices de vegetação também apresentaram uma maior variabilidade nos estádios iniciais, de forma similar ao NDVI.

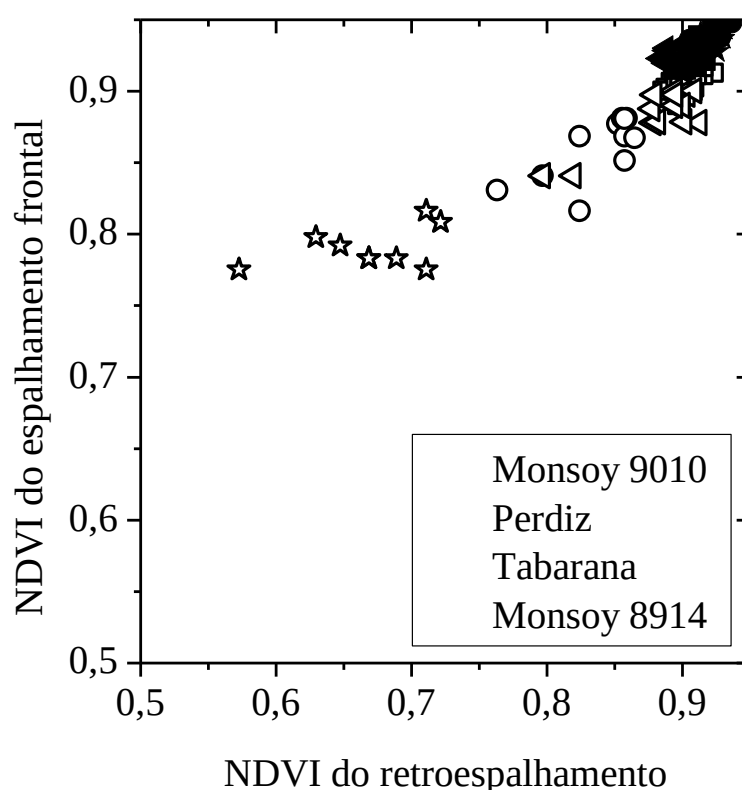


Figura 4.35 - Variações do NDVI em função de distintas variedades de soja e pares de imagens adquiridas em ângulos de visada de direções opostas, para um dossel incompleto (21 e 22 de dezembro de 2005, representado pelos símbolos abertos) e para um dossel fechado (23 e 24 de janeiro de 2006, símbolos fechados).

4.2.2 Efeitos direcionais sobre os índices de vegetação diários do MODIS

Devido à maior influência da sombra na radiação do vermelho em relação ao IVP (LEBLON et al., 1996; APARICIO et al., 2004), os valores de NDVI (calculado a partir das imagens MODIS de 250 m) derivados de imagens adquiridas na direção do espalhamento frontal foram predominantemente superiores aos valores do NDVI derivados de imagens adquiridas na direção do retroespalhamento (Figura 4.36). Conforme ilustrado no perfil temporal do índice, considerando a variedade Emgopa (safra 2004-2005 na fazenda Mutum), as diferenças do NDVI devido aos efeitos direcionais foram maiores nos estádios iniciais do desenvolvimento da soja e diminuíram à medida que o dossel fechou.

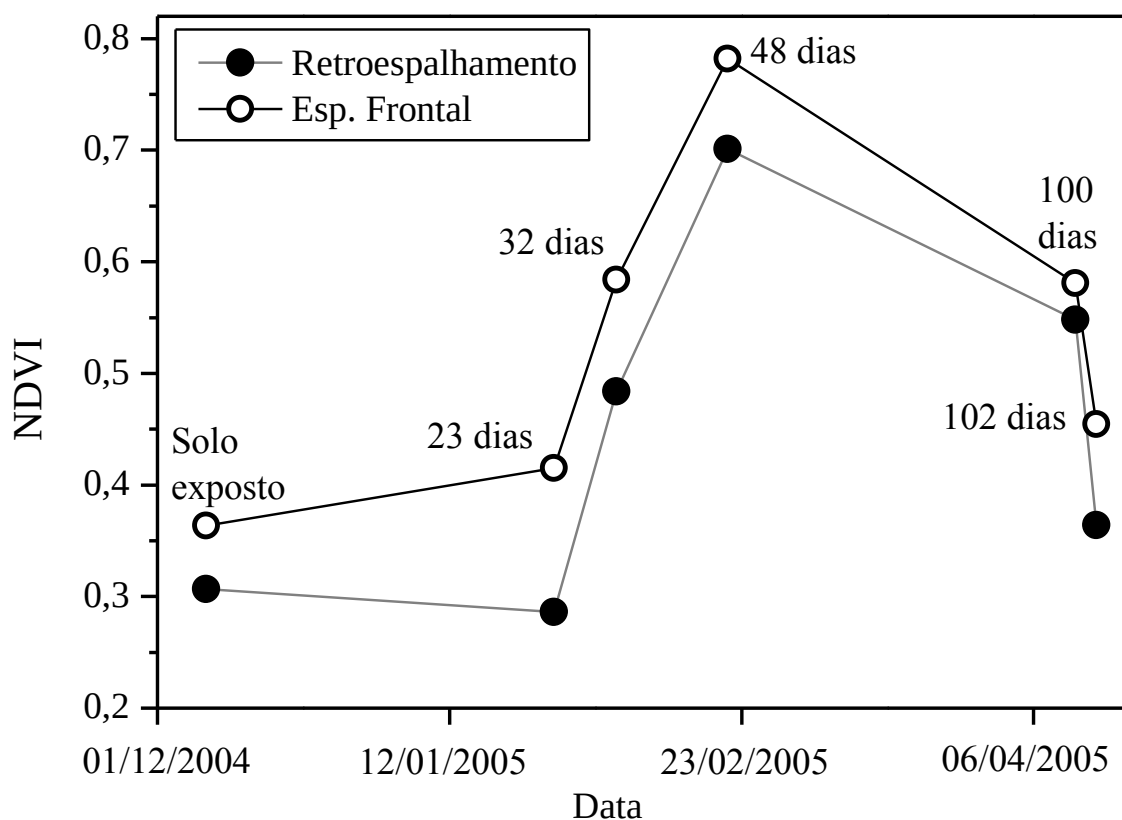


Figura 4.36 – Variação do NDVI para a variedade Emgopa (fazenda Mutum) para pares de imagens MODIS adquiridas em estádios de desenvolvimento constantes (dias consecutivos) e com ângulos de visada obtidos em direções opostas (retroespalhamento e espalhamento frontal). Os dias após o plantio estão indicados. Os valores dos ângulos de visada são apresentados na Tabela 3.5.

As maiores diferenças do NDVI MODIS foram observadas aos 23 dias após o plantio, atingindo o valor de 0,13. Este valor é muito superior às incertezas associadas à determinação do NDVI MODIS, que foram estimadas em $\pm 0,01$ para condições de atmosfera normal e para incertezas na calibração da reflectância da ordem de 2% (Miura et al., 2000). Em um estudo conduzido por HU et al. (2000), utilizando dados do AVHRR, as diferenças de NDVI associadas ao ângulo zenital de visada oscilaram de 0,07 (para floresta) a 0,15 (campos/gramíneas). Meyer et al. (1995) reportaram diferenças de até 0,15 dentro de uma composição 10-dias do AVHRR devido aos efeitos angulares.

Os resultados da Figura 4.36 derivados do nível orbital concordam com os resultados obtidos por Epiphanio e Huete (1995) e Walter-Shea et al. (1997), com experimentos de campo, que demonstraram que os efeitos direcionais são mais significativos em dosséis esparsos e decrescem à medida que o IAF aumenta (dossel fecha) passando a assumir um caráter mais isotrópico.

Na análise dos efeitos direcionais sobre o NDVI através de regressões lineares (com intercepto fixo em zero) entre os valores de NDVI (MODIS 250 m) calculados de imagens do retroespalhamento e do espalhamento frontal, verificaram-se variações significativas na inclinação da reta (β) para as diferentes classes de ângulos de visada (0–25°; 25–45°; 45–60°). Apesar de parecerem pequenas (Figura 4.37), as diferenças podem afetar significativamente as estimativas de IAF derivadas da relação entre NDVI e IAF (modelos empíricos).

A análise estatística a 95% de confiança mostrou que não foram encontradas diferenças significativas entre os valores de NDVI calculados a partir de imagens obtidas em direções opostas (retroespalhamento e espalhamento frontal), para ângulos zenitais de visada inferiores a 25° (próximo ao nadir) (Tabela 4.1). Entretanto, diferenças significativas foram encontradas para ângulos de visada superiores a 25°, conforme indicado pelos limites inferiores e superiores do intervalo de confiança, que foram superiores a 1 na Tabela 4.1. Se $\beta_i < 1 < \beta_s$ tem-se que não há diferenças significativas entre as amostras.

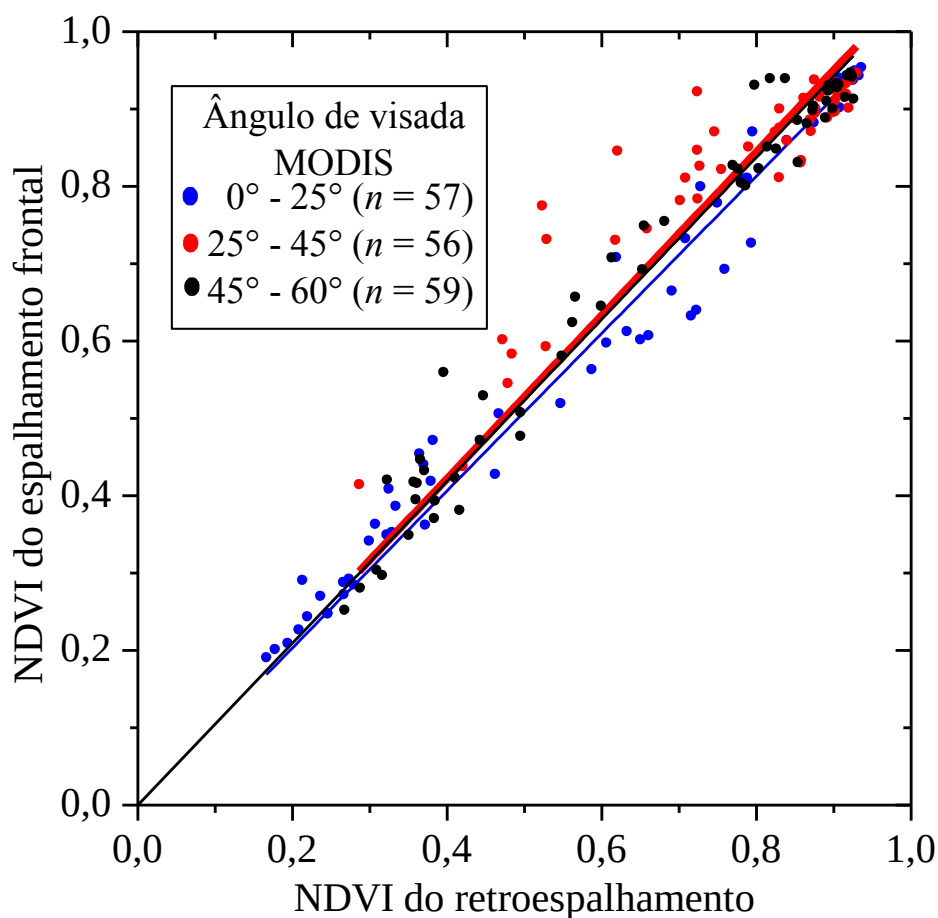


Figura 4.37 - Relação de regressão com intercepto fixo em zero para os valores de NDVI derivados de imagens MODIS obtidas nas direções do retroespalhamento e do espalhamento frontal, para três classes de ângulo de visada. Um total de 13 pares de imagens MODIS (250 m) (Tabela 3.5) e todas as variedades foram consideradas nas análises.

Tabela 4.1 – Efeitos direcionais sobre o NDVI para a direção do retroespalhamento e espalhamento frontal e em função das classes de ângulo. N representa o número de pares de NDVI com direções de visada opostas, obtidos nas 13 datas apresentada na Tabela 3.5.

Classe angular	N	Inclinação da reta (β)	Limite de confiança inferior (β_i)	Limite de confiança superior (β_s)
0°-25°	57	1,01673	0,99764	1,03582
25°-45°	56	1,05596*	1,03308	1,07885
45°-60°	59	1,04724*	1,03141	1,06308

A inspeção dos valores de NDVI calculados para a variedade Emgopa (fazenda Mutum) a partir de imagens obtidas em datas próximas (21 e 22 de fevereiro de 2005) e com ângulos zenitais de visada opostos (42° e -44° , respectivamente), mostrou a predominância de valores de NDVI maiores para a imagem da direção do espalhamento frontal (Figura 4.38 b). Por outro lado, os valores de NDVI na direção do retroespalhamento (Figura 4.38 a) foram inferiores. A diferença chegou a 0,13 entre ambos os NDVI calculados em direções de visada opostas (Figura 4.38 c).

Quando foi feita uma análise em função dos dias após o plantio, os resultados não foram conclusivos, provavelmente devido à presença de distintas variedades que apresentam diferentes taxas de crescimento (desenvolvimento) após o plantio (Tabela 4.2). Além disso, ao dividir os dados de acordo com os dias após o plantio, o número de amostras para cada classe foi reduzido significativamente. Em geral, os efeitos direcionais causaram diferenças significativas em seis das nove classes de ângulos de visada e dias após plantio analisadas.

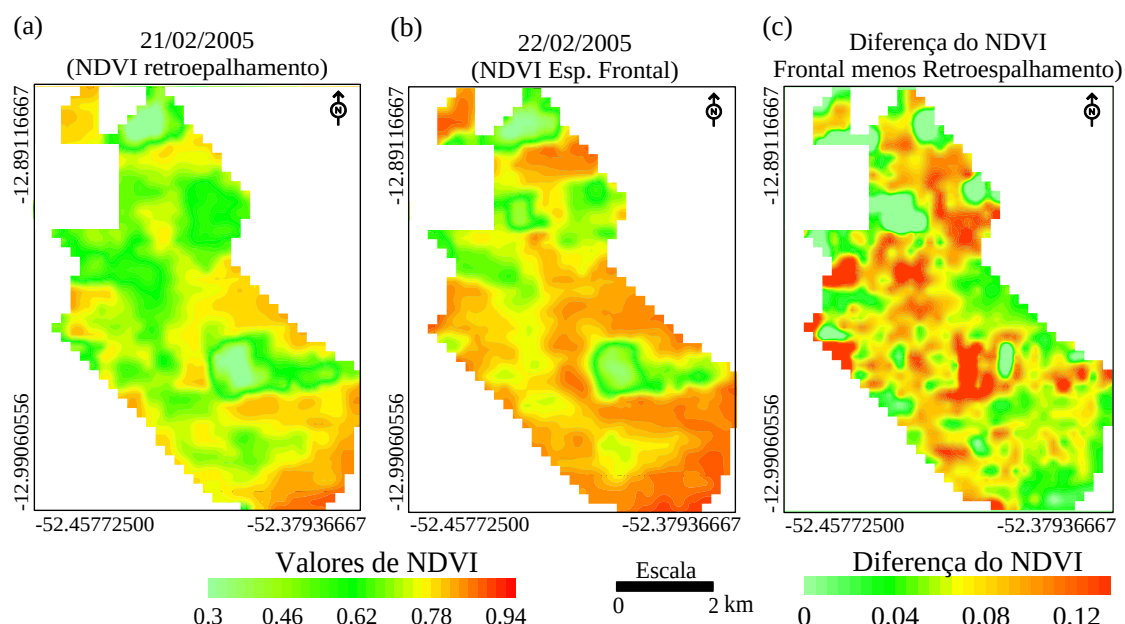


Figura 4.38 – Variação espacial do NDVI (fazenda Mutum) para um mesmo estágio de desenvolvimento da soja, calculado da direção de (a) retroespalhamento e (b) espalhamento frontal. As diferenças entre ambas as imagens de NDVI são apresentadas na figura (c).

Tabela 4.2 – Efeitos direcionais do NDVI MODIS calculado com imagens obtidas na direção do espalhamento frontal e retroespalhamento, considerando diferentes estádios de desenvolvimento da soja e classes de ângulo. N representa o número de pares de imagens com ângulos de visada opostos.

Classe de ângulo	Dias após o plantio (dias)	N	Inclinação da reta (β)	Limite de confiança inferior (β)	Limite de confiança superior (β)
0°-25°	< 45	18	1,02847	0,99151	1,06542
0°-25°	45-90	13	1,02593*	1,00332	1,04854
0°-25°	> 90	8	1,03875*	1,00349	1,07401
25°-45°	< 45	9	1,15445*	1,04800	1,26090
25°-45°	45-90	10	1,00530	0,98858	1,02202
25°-45°	> 90	33	1,05230*	1,03067	1,07394
45°-60°	< 45	23	1,06063*	1,00991	1,11135
45°-60°	45-90	28	1,03617*	1,02019	1,05214
45°-60°	> 90	8	0,97177	0,93778	1,00576

*O NDVI foi estatisticamente diferente entre as duas direções de visada a 95% de confiança.

A avaliação do NDVI (Figura 4.36 e Figura 4.39) e do EVI (Figura 4.40) da variedade Perdiz em função do desenvolvimento fenológico e da direção de espalhamento mostrou que as diferenças causadas pelos efeitos direcionais são reduzidas durante o desenvolvimento desta variedade (Apêndice C). Contudo, ainda estão presentes e podem afetar significativamente as estimativas de parâmetros biofísicos através de modelos empíricos não lineares (conforme será discutido na seção 4.3). No caso do EVI (Figura 4.41) as diferenças atribuídas aos efeitos direcionais foram levemente reduzidas. Aos 48 dias após o plantio (dossel fechado), o EVI mostrou-se mais sensível aos efeitos direcionais. O valor do EVI foi maior para a direção do retroespalhamento, devido à alta dependência do EVI da reflectância na banda do IVP, diferente do NDVI que apresenta maior dependência da reflectância na banda do vermelho.

Uma avaliação do potencial uso do EVI para estimar parâmetros biofísicos foi precedida de testes de correlação entre o EVI e as bandas utilizadas para calcular este índice. Os resultados mostraram um coeficiente de determinação (R^2) de 0,72 para covariação positiva entre o EVI e a reflectância da banda do IVP (Figura 4.42). Esse resultado concorda com o EVI calculado a partir das simulações no PROSAIL, onde os gráficos são praticamente idênticos (IVP - Figura 4.12 e EVI - Figura 4.20). Para gerar resultados conclusivos, novos estudos são necessários, a exemplo do EVI-2 (Figura 4.24

b) proposto por Jiang et al. (2008).

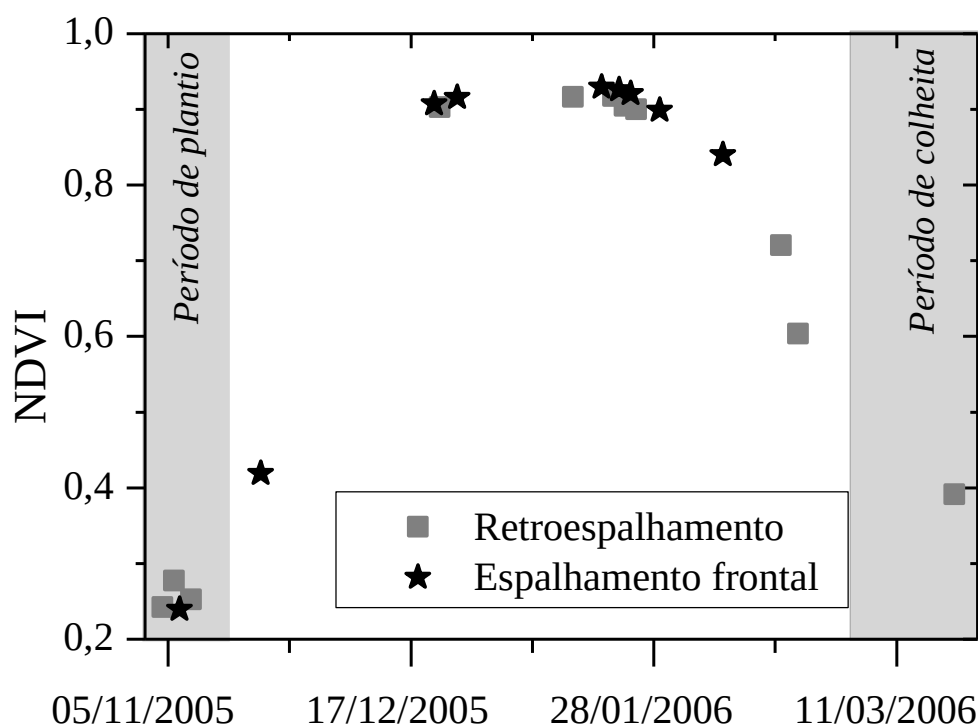


Figura 4.39 - Variação do NDVI em função do desenvolvimento fenológico da variedade Perdiz e do ângulo de visada MODIS.

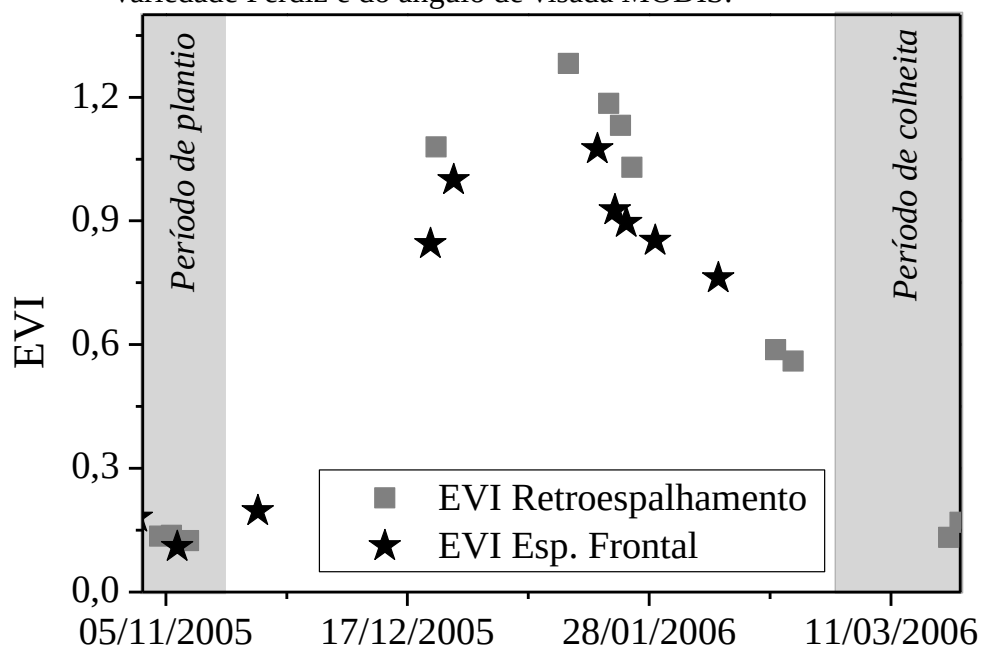


Figura 4.40 - Variação do EVI em função do desenvolvimento fenológico da variedade Perdiz e do ângulo de visada MODIS.

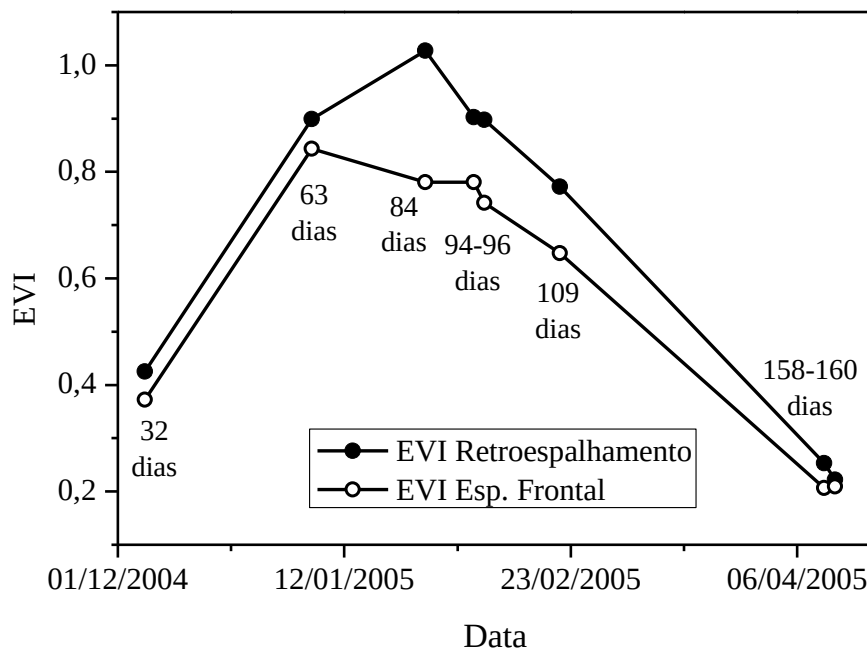


Figura 4.41 – Variação do EVI para a variedade Perdiz (fazenda Tanguro) para pares de imagens MODIS adquiridas em estágio de desenvolvimento constantes (dias consecutivos) e com ângulos de visada em direções opostas (retroespalhamento e espalhamento frontal). Os dias após o plantio estão indicados.

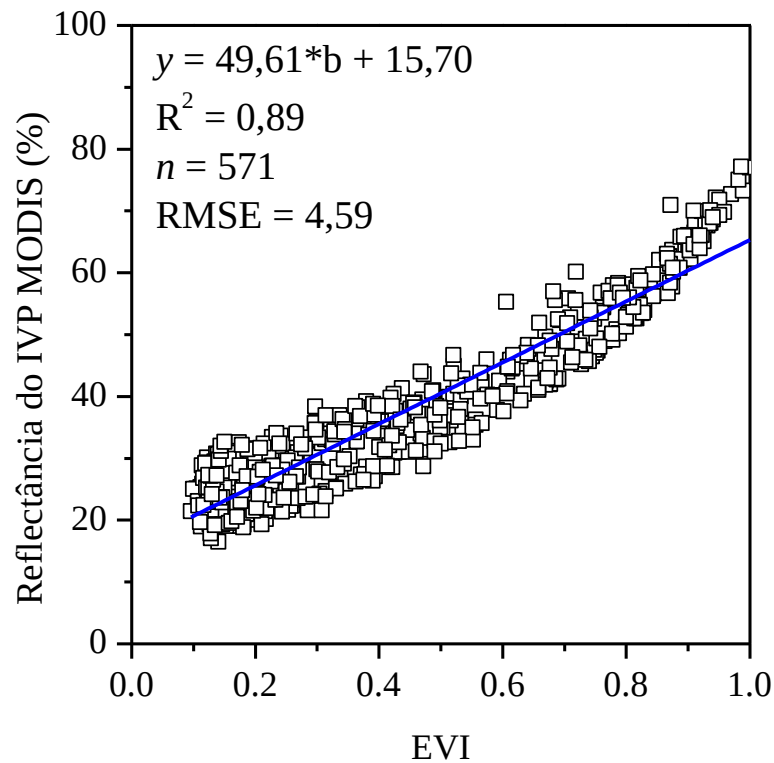


Figura 4.42 – Relação entre o EVI e a reflectância da banda do IVP utilizada para o cálculo do EVI. A reta de regressão está indicada em azul.

Os NDWIs modificados (Tabela 3.8) apresentaram o mesmo comportamento do NDVI. Assim, verificou-se que, devido a esse comportamento (p. ex. NDVI na direção do espalhamento frontal sempre ser maior), as composições de 8-dias ou 16-dias dos índices de vegetação do produto MODIS (MODIS 13Q1) tendem a apresentar uma tendência de selecionar pixels em função dos efeitos direcionais e não em função dos efeitos atmosféricos, conforme discutido por Meyer et al. (1995), quando os autores trabalharam com dados do AVHRR e o procedimento de seleção de pixels baseado no máximo valor. Em um teste feito com uma composição de 8-dias hipotética (centrada no dia 17 de janeiro de 2006) e o procedimento de seleção pelo máximo valor, verificou-se que 87,6% dos valores de NDVI foram extraídos de imagens obtidas na direção do espalhamento frontal. Assim, essas composições podem estar refletindo a presença de sombra e não a informação espectral do alvo. Como alternativa, a seleção dos pixels pode ser feita com base nos valores de reflectância, que tendem a selecionar pixels da direção do retroespalhamento para a reflectância das bandas do vermelho e do IVP (maior valor). Desta forma, os efeitos da sombra tendem a ser reduzidos nos índices de vegetação.

4.2.3 Análise de sensibilidade dos índices de vegetação aos efeitos da geometria de visada do sensor MODIS

Os coeficientes do teste não paramétrico Wilcoxon Signed Rank utilizados para avaliar as diferenças entre os índices de vegetação calculados para um mesmo estágio fenológico e direções de ângulo zenital de visada opostas: espalhamento frontal (ângulo de visada de -58° no dia 21 de dezembro de 2005) e retroespalhamento (41° no dia 22 de dezembro de 2005) - mostraram que o NDVI foi menos afetado pelos efeitos direcionais do que os demais índices. Ele apresentou valores de Z mais próximo de zero em comparação com EVI, $NDWI_{1640}$ e o $NDWI_{2120}$ (Tabela 4.3). Esses dois últimos índices, que exploram a relação IVP-SWIR apresentaram diferenças mais significativas quando calculados a partir de imagens obtidas em direções de visada opostas e para um estágio fenológico fixo. O mesmo comportamento foi identificado para pares de imagens do ano-safra 2004-2005. Esse resultado concorda com as simulações feitas com o PROSAIL, considerando as duas formulações modificadas do NDWI (Figura

4.24 c;d). Devido à presença de ruído na banda 5 do MODIS, o NDWI original proposto por Gao (1996) não pôde ser avaliado com dados reais medidos pelo sensor MODIS.

Tabela 4.3 – Coeficientes do teste não paramétrico Wilcoxon Signed Rank para avaliar as diferenças entre índices de vegetação calculados para um mesmo estágio fenológico e geometria de visada na direção do espalhamento frontal (ângulo de visada de -58° no dia 21 de dezembro de 2005) e retroespalhamento (41° no dia 22 de dezembro de 2005).

Espalhamento frontal versus retroespalhamento	n	Resultados do Wilcoxon Signed Ranks Test*						
		Min. Z	Mediana Z	Max. Z	Z S.D.	Mediana p	Média p	p S.D.
NDVI	72	-6,460	-4,319	-1,094	0,737	<0,000	0,001	0,010
EVI	72	6,701	7,273	7,376	0,098	< 0,000	< 0,000	< 0,000
NDWI ₁₆₄₀	72	-7,376	-6,847	-5,511	0,333	< 0,000	< 0,000	< 0,000
NDWI ₂₁₂₀	72	-7,376	-7,333	-7,066	0,057	< 0,000	< 0,000	< 0,000

* Valor obtido após o uso da técnica de reamostragem bootstrapping com 1000 iterações.

A normalização angular (conforme a Equação 3.1) dos índices de vegetação calculados a partir de dias consecutivos, mas com direções de visada opostas, confirmaram os resultados do teste Wilcoxon Signed Rank (Figura 4.43). O NDVI apresentou valores médios normalizados mais próximos a zero e assim, verificou-se que este índice de vegetação foi menos sensíveis aos efeitos direcionais em comparação com o NDWI₁₆₄₀, NDWI₂₁₂₀. Em geral, o EVI apresentou a maior dependência dos efeitos direcionais. Isso ocorreu devido a sua alta correlação com a banda do IVP (Figura 4.42).

Considerando os quatro índices de vegetação estudados, a sensibilidade aos efeitos direcionais diminuiu de um dossel incompleto (21 e 22 de dezembro de 2005) para um dossel de soja completamente fechado (23 e 24 de janeiro de 2006). Novamente, foi encontrada uma concordância com os resultados experimentais obtidos por Epiphanyo e Huete (1995) e Walter-Shea et al. (1997) e com as simulações feitas no PROSAIL (Figura 4.18 e Figura 4.22).

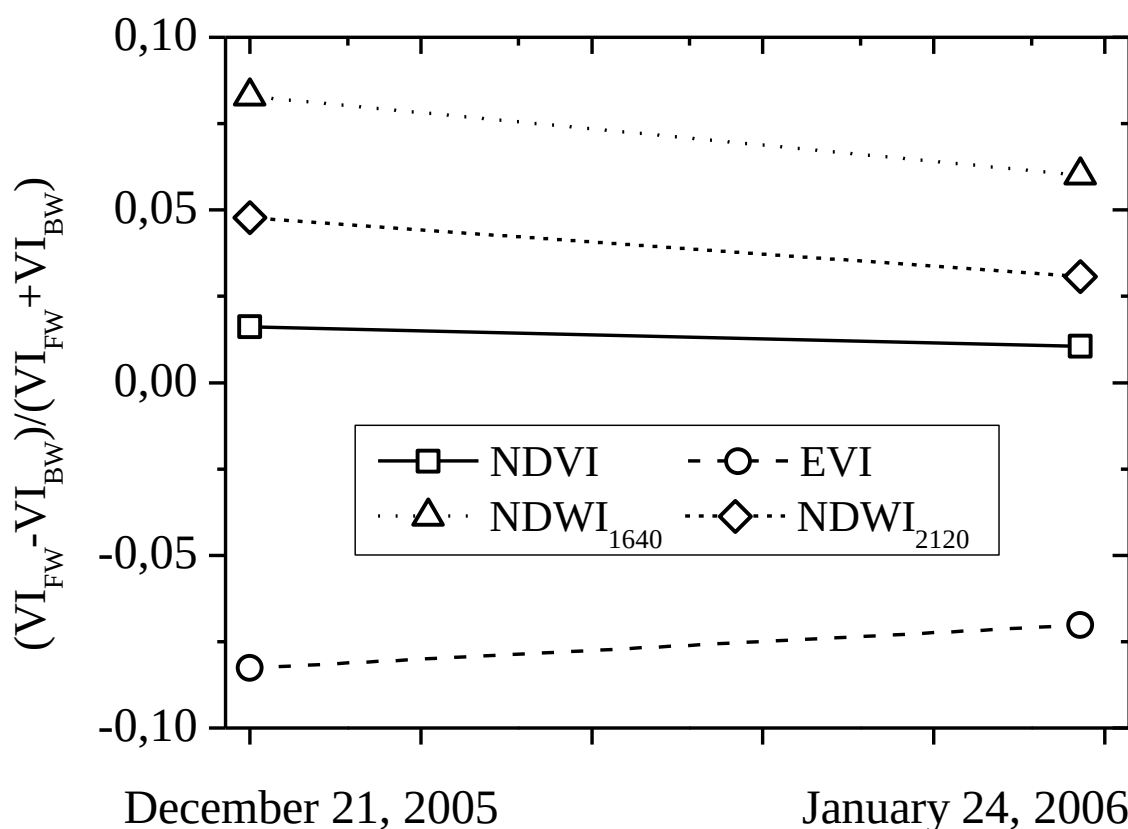


Figura 4.43 – Normalização angular (valores médios) dos quatro índices de vegetação estudados, calculados a partir de imagens obtidas em dias consecutivos e em ângulos de visada em direções opostas, para dosséis de soja incompletos (21 e 22 de dezembro de 2005) e completos (23 e 24 de janeiro de 2006).

Para o ano-safra 2004-2005 a inspeção dos índices normalizados (análise pixel-a-pixel) mostrou uma predominância do NDVI como o índice de vegetação menos sensível aos efeitos direcionais em 77% e 98% dos casos para o dossel incompleto (6 e 8 de dezembro de 2004) e completo (5 e 6 de fevereiro de 2005), respectivamente (Figura 4.44). Para o ano-safra 2005-2006, o NDVI foi menos sensível em 79% (dossel incompleto em 21 e 22 de dezembro de 2005) e 100% (dossel fechado em 23 e 24 de janeiro de 2006) dos casos (Figura 4.45). Em ambos os anos-safra, os NDWI foram o segundo índice de vegetação (em termos de frequência de pixels menos sensíveis) menos afetado pelos efeitos direcionais do ângulo zenital de visada do MODIS.

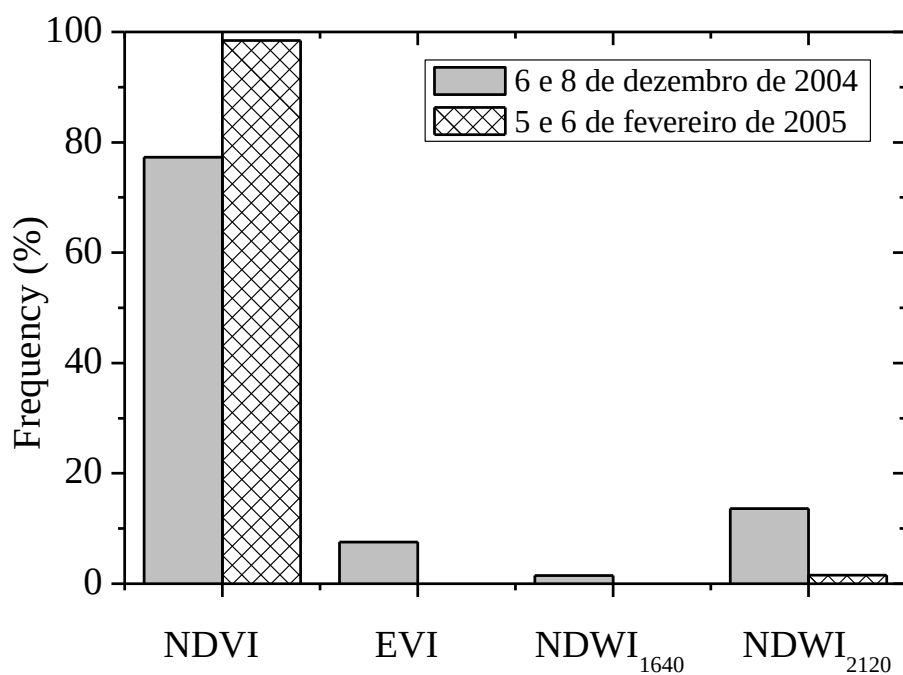


Figura 4.44 – Frequência dos pixels dos índices de vegetação (diferenças angulares) com a menor sensibilidade aos efeitos direcionais para um dossel de soja incompleto (dezembro) e dossel completo (janeiro) no ano-safra 2004-2005.

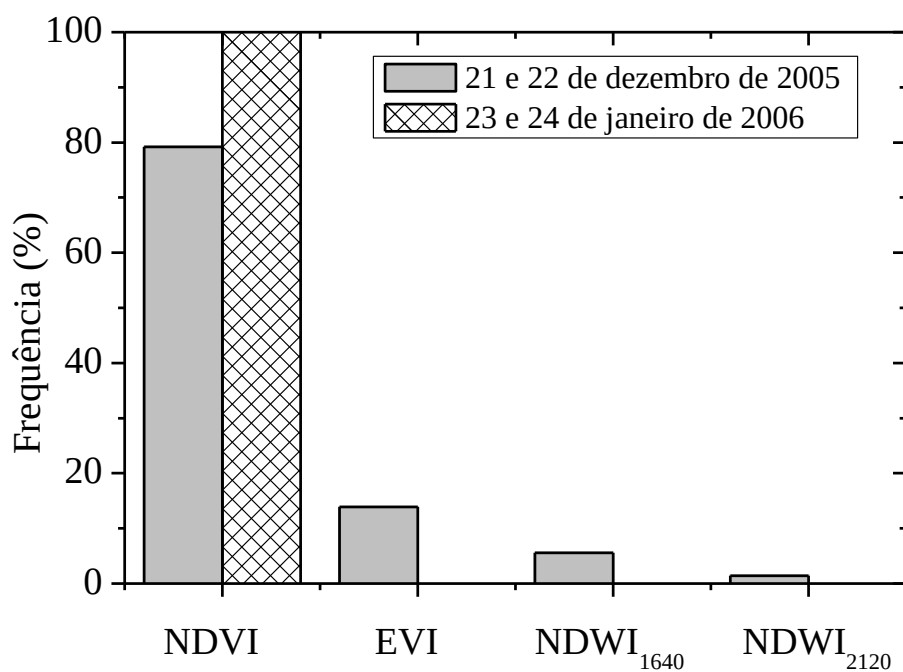


Figura 4.45 – Frequência dos pixels dos índices de vegetação (diferenças angulares) com a menor sensibilidade aos efeitos direcionais para um dossel de soja incompleto (dezembro) e dossel completo (janeiro) no ano-safra 2005-2006.

4.3 Avaliação dos efeitos direcionais sobre as estimativas de IAF a partir de modelos empíricos

4.3.1 Avaliação do produto IAF MODIS (MOD15A2)

Com base no produto MOD15A2 (estimativa de IAF) da coleção 5 dos dois anos-safra (2004-2005 e 2005-2006), a frequência de pixels sobre as fazendas estimados através do algoritmo de backup (modelo empírico do MODIS) aumentou gradualmente com o aumento da cobertura de nuvens, justamente no período de maior desenvolvimento da soja (Figura 4.46). As maiores frequências de estimativas de IAF feitas pelo algoritmo de backup do MODIS foram de 81% e 94% para os anos-safra 2004-2005 e 2005-2006, respectivamente. Estes valores foram observados no período de máximo desenvolvimento do dossel da soja, entre janeiro e fevereiro. Esse período coincide com o pico da cobertura de nuvens na região. Os resultados apresentados na Figura 4.46 concordam com os resultados reportados por Rizzi et al. (2006), que estudaram o produto IAF do MODIS da coleção 4, para lavouras de soja localizadas no centro-norte do estado do Rio Grande do Sul.

No presente estudo, a avaliação do produto de cobertura da terra (MOD12Q1) mostrou que aproximadamente 45% (2004-2005) e 76% (2005-2006) dos pixels localizados sobre as quatro fazendas foram corretamente classificados como bioma 3 (broadleaf crops) (Tabela 4.4). Os maiores erros foram associados à classe savana e gramíneas e cereais (Grasses/Cereal crops). Para gerar as estimativas de IAF, o algoritmo do MODIS utiliza determinado modelo computacional para representar o dossel (cilíndrico, esférico, etc.) adequado à fisiologia geral da vegetação de cada bioma. Assim, classificações errôneas do tipo de bioma podem produzir diferentes estimativas de IAF para uma mesma entrada (*input*) em termos de valores de reflectância e NDVI (DINER et al., 1999).

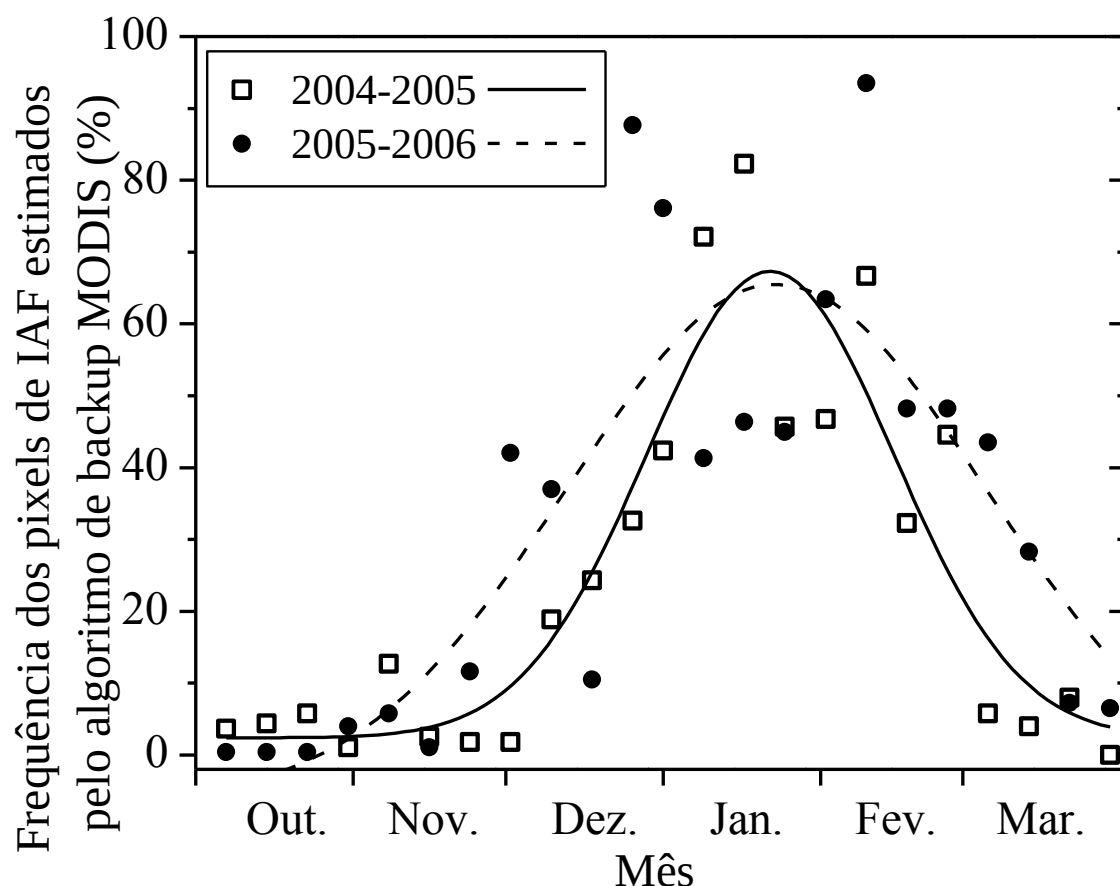


Figura 4.46 – Frequência dos pixels de IAF que tiveram seus valores estimados pelo algoritmo de backup do MODIS, considerando as quatro fazendas em estudo. A frequência foi determinada a partir de 23 imagens para cada ano-safra da composição 8-dias do produto de IAF MOD15A2. Foram utilizadas funções gaussianas ajustadas aos dados para facilitar a interpretação e visualização das tendências.

Além da classificação errônea do bioma, existem vários outros fatores que podem afetar a qualidade das estimativas de IAF. Entre elas estão a saturação da reflectância em dosséis densos (alto valor de IAF) e a dependência do algoritmo em relação à escala. As falhas do algoritmo principal (não uso do modelo de transferência radiativa para estimar o IAF) normalmente estão associadas às incertezas nos dados de reflectância de superfície utilizados como entrada (*input*) (p.ex. correção atmosférica) e a própria formulação do modelo (MYNENI et al., 2002). De acordo com Myneni et al. (2002), para a correta geração das estimativas de IAF pelo modelo principal, os valores da reflectância de superfície devem variar aproximadamente entre o intervalo de 2-16% para a banda do vermelho e de 10-42% na banda do IVP. No período de máximo

desenvolvimento da soja (nas fazendas estudadas) foi verificada uma baixa reflectância para a banda do vermelho (menor que 4%) e uma reflectância muito alta na banda do IVP (maior que 50%). Consequentemente, verificou-se que o uso do algoritmo de backup ocorreu com maior predominância exatamente neste período.

Tabela 4.4 – Frequência da classificação dos pixels do produto MOD12Q1 localizados nas quatro fazendas estudadas, para os anos-safra 2004-2005 e 2005-2006.

Avaliação da classificação em relação à classe 3 "broad-leaf crops"					
LAI/fPAR (Bioma)	Ano →	2004/2005	2005/2006	2004/2005 %	2005/2006 %
Bioma 3 (Broad-leaf crops)	→	469	793	44,84	75,82
Outros biomas	→	577	253	55,16	24,18
Total	→	1046	1046	100	100
Detalhamento da classificação da cobertura nas fazendas					
LAI/fPAR (classe)	bioma	2004 2005	2005 2006	2004/200 %	2005/2006 %
Gramineas/ culturas de cereais (Grasses/Cereal crops)	1	117	24	11,18	2,29
Arbustos (Shrubs)	2	4	2	0,38	0,19
Culturas de folhas largas (Broad-leaf crops)	3	469	793	44,84	75,81
Savanas/Cerrado (Savanna)	4	447	222	42,73	21,22
Floresta Perene de folhas largas (Evergreen Broad-leaf forest)	5	7	5	0,67	0,48
Floresta Caducifolia de folhas largas (Deciduous Broad-leaf forest)	6	2	0	0,19	0,00
Floresta Ombrófila de folhas aciculares (Evergreen Needle-leaf forest)	7	0	0	0,00	0,00
Floresta Estacional Decidual de folhas aciculares (Deciduous Needle-leaf forest)	8	0	0	0,00	0,00
Sem vegetação (Non-vegetated)	9	0	0	0,00	0,00
Urbano (Urban)	10	0	0	0,00	0,00
Total		1046	1046	100	100

4.3.2 Modelos empíricos de estimativa de IAF

Os índices de vegetação são amplamente utilizados para estimar parâmetros biofísicos da vegetação (HOUBORG et al., 2007). Um modelo empírico “global” foi proposto por Knyazikhin et al. (1999) no MOD15 LAI/fPAR Algorithm Theoretical Basis Document (ATBD), relacionando intervalos regulares de NDVI e o IAF. Nossa avaliação se deteve ao bioma 3 (broadleaf crops). Este modelo “global” consiste em uma regressão entre intervalos regulares de NDVI e valores de IAF (Figura 4.47). Verifica-se que este modelo empírico satura para valores de IAF acima de seis. Em paralelo, um modelo empírico “local” foi elaborado, baseado nas relações entre o NDVI os valores de IAF estimados pelo algoritmo principal (modelo de transferência radiativa) do produto MODIS (Figura 4.47). Assim, foi elaborada uma equação de regressão ajustada às quatro fazendas em estudo. Apenas as relações entre NDVI com IAF foram testadas, apesar dos ajustes lineares encontrados por Maire et al. (2011) entre *Generalized Soil Adjusted Vegetation Index* (GESAVI) e o IAF de plantações de Eucaliptos.

A comparação entre o modelo empírico “local” e “global” com o IAF estimado pelo algoritmo backup do MODIS mostrou que as maiores diferenças ocorrem na faixa de NDVI entre 0,70 e 0,85 (faixa tracejada da Figura 4.47). As estimativas de IAF através do modelo empírico “local” foram linearmente correlacionadas com as estimativas de IAF do algoritmo backup (coleção 5 do produto IAF MODIS), atingindo um coeficiente de determinação (R^2) de 0,91 (Figura 4.48 a). Contudo, foi verificada uma tendência de subestimar o IAF para condições de IAF alto. Por outro lado, o modelo empírico “global” apresentou um valor de R^2 de 0,87 com tendência de superestimar o IAF para condições de IAF alto (Figura 4.48 b) (Breunig et al., 2010). Ambos os modelos foram sensíveis aos efeitos direcionais do ângulo zenital de visada do MODIS, especialmente para a faixa de NDVI entre 0,70 e 0,85.

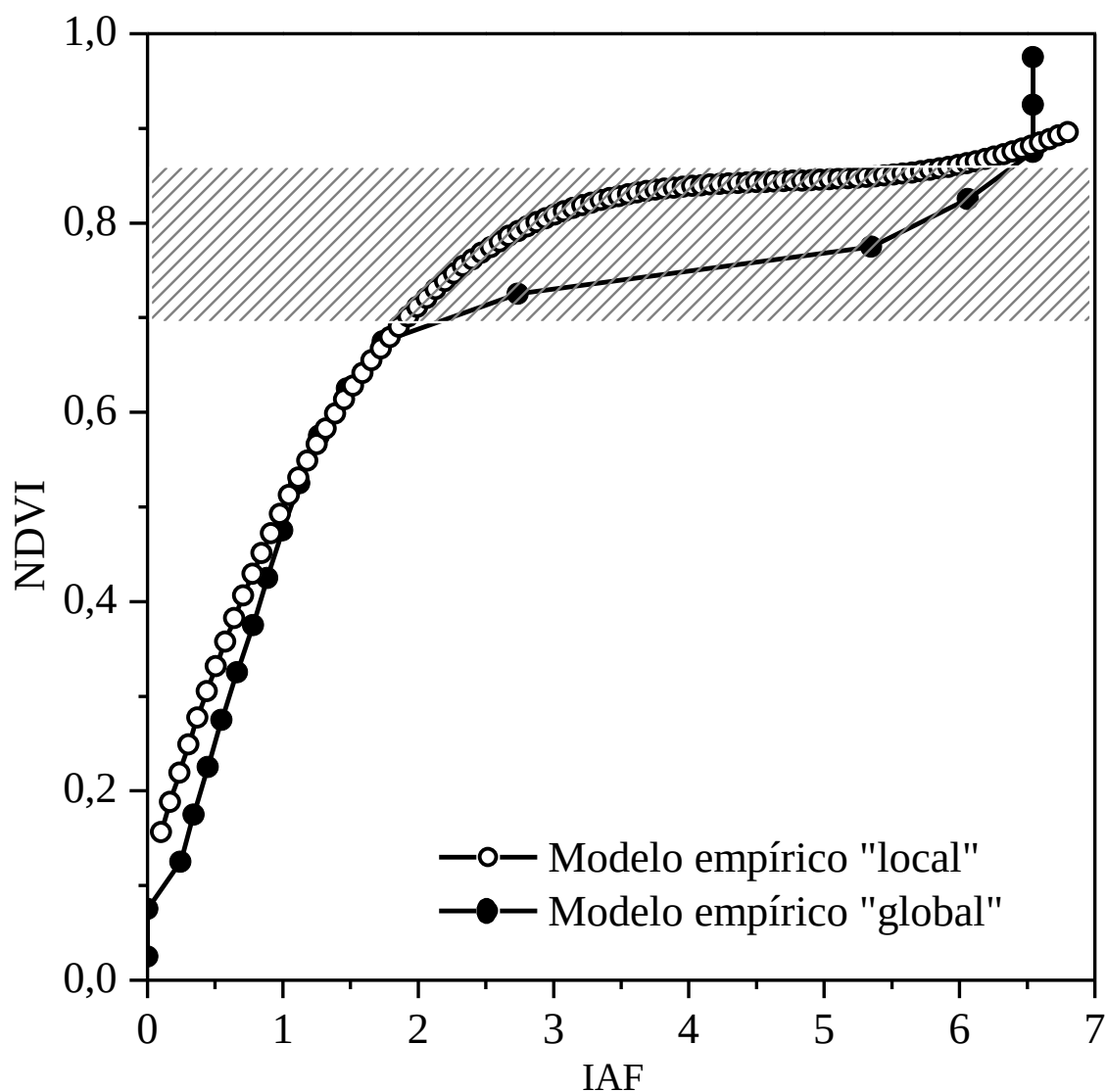


Figura 4.47 – Modelos empíricos “local” e “global” (Knyazikhin et al., 1999; broadleaf crops) entre NDVI e IAF. A faixa tracejada mostra uma região onde pequenas variações do NDVI podem gerar grandes diferenças no IAF estimado pelo modelo.

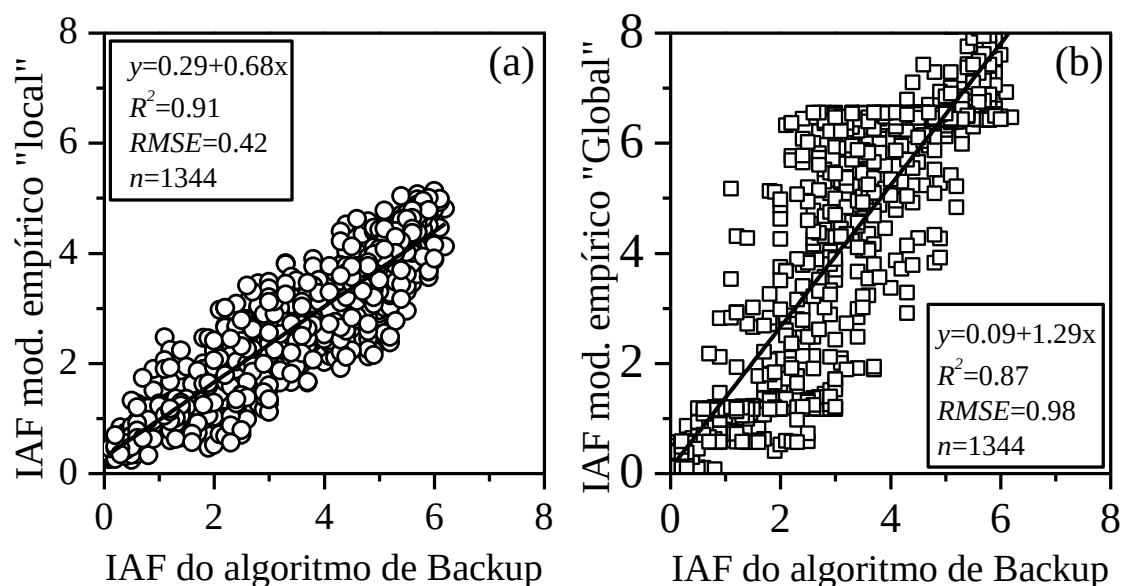


Figura 4.48 – Relação entre as estimativas de IAF geradas pelo algoritmo backup do MODIS e os modelos empíricos (a) “local” e (b) “global” (ATBD MOD15; Knyazikhin et al., 1999).

As estimativas diárias de IAF geradas utilizando os modelos empíricos “global” e “local” apresentaram valores mais altos na direção do espalhamento frontal (Figura 4.49) devido à presença de valores de NDVI superiores para a direção do espalhamento frontal em comparação aos valores derivados da direção do retroespalhamento (Figura 4.36). Em geral, o modelo empírico “local” apresentou menor sensibilidade aos efeitos direcionais, especialmente aos 48 dias após o plantio da variedade Emgopa (cultivada na fazenda Mutum no ano-safra 2004-2005) (Figura 4.49). Assim, pode-se concluir que apesar da menor sensibilidade do modelo empírico “local” aos efeitos direcionais, as diferenças ainda são significativas.

O resultado apresentado na Figura 4.49 permite deduzir uma explicação para o fato de a maioria dos pixels de IAF estimados pelo algoritmo backup (MODIS) nas composições de 8-dias de IAF do produto MOD15A2 (baseado no procedimento de máximo valor) ser derivada da direção do espalhamento frontal, especialmente nos meses de janeiro e fevereiro, onde é verificada a maior cobertura de nuvens na região (p.ex. 87,6% para a composição centrada em 17 de janeiro de 2006) (Figura 4.46). Conforme exposto por

Meyer et al. (1995), este procedimento (máximo valor) tende a selecionar os pixels em função da direção de espalhamento e não em função da qualidade das imagens (p.ex. correção atmosférica), resultando em superestimativas de IAF (BREUNIG et al., 2010, 2011).

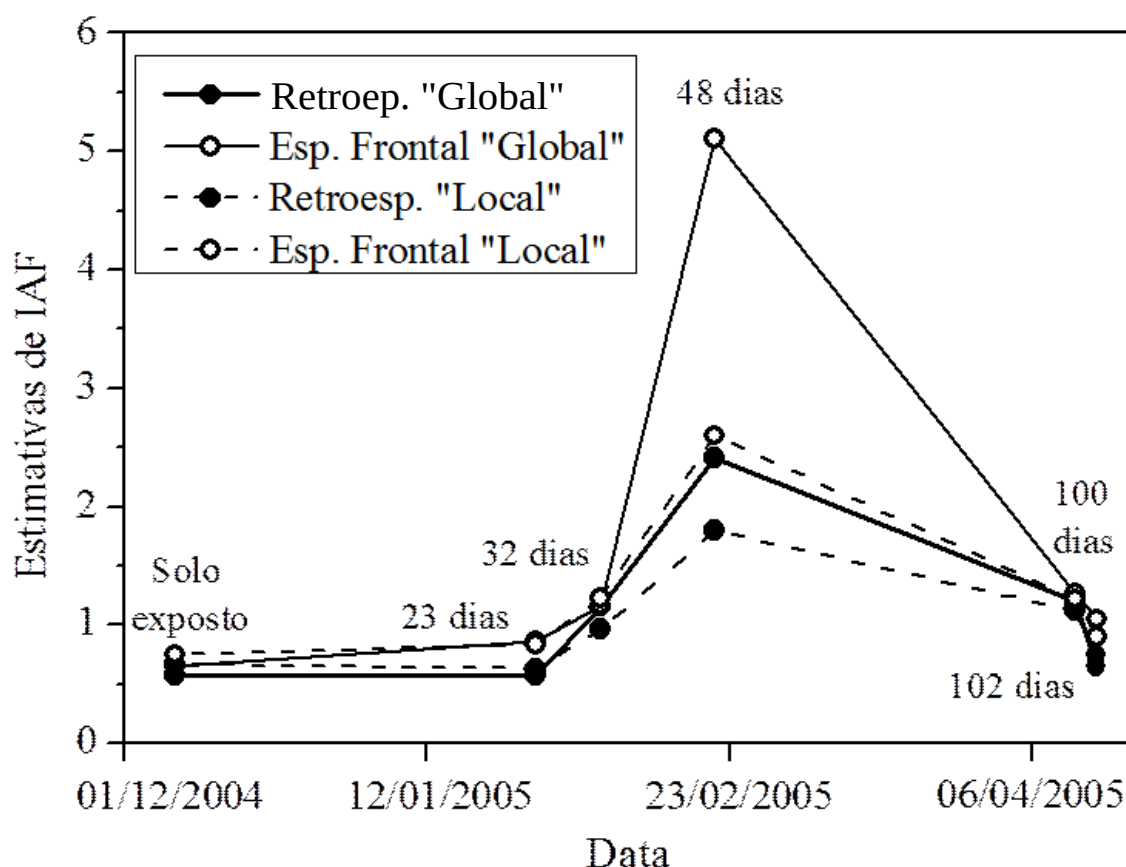


Figura 4.49 – Estimativas de IAF para a variedade Emgopa (fazenda Mutum; ano-safra 2004-2005) feitas utilizando o modelo empírico “global” (linhas sólidas) e o modelo empírico “local” (linhas tracejadas), baseados na relação entre NDVI e IAF. Os dias após o plantio são indicados. As estimativas foram plotadas para pares de imagens adquiridas em um mesmo estágio fenológico e com direções de visada opostas (Tabela 3.5).

Na Figura 4.36 as maiores diferenças do NDVI devido aos efeitos direcionais foram encontradas nos estádios de desenvolvimento iniciais da soja (p.ex. 23 dias após o plantio), conforme esperado na literatura (EPIPHANIO; HUETE, 1995; WALTER-SHEA et al., 1997). Entretanto, na Figura 4.49, as maiores diferenças de IAF foram encontradas em um estágio de maior desenvolvimento da soja (48 dias após o plantio). Conforme pode ser deduzido da Figura 4.47, pequenas variações no NDVI devido aos

efeitos direcionais podem causar grandes diferenças nas estimativas de IAF no período de grande desenvolvimento da soja, quando o dossel está fechado (faixa tracejada com valores de NDVI entre 0,70 e 0,85 na Figura 4.47). Essas variações são superiores às variações esperadas para um dossel aberto (com NDVI inferior a 0,5).

Cabe destacar que resultados similares foram encontrados para outras variedades de soja, que apresentaram maiores diferenças de IAF em função da direção de espalhamento em relação às variações associadas ao desenvolvimento fenológico, considerando uma mesma amplitude de variação do NDVI. Conforme pode ser visto na Figura 4.50, as variações do IAF da variedade Monsoy 8914 foram significativas, principalmente aos 47 dias após o plantio. Assim, em termos de dias após o plantio (indicação de estágio de desenvolvimento da soja) os resultados sugerem um maior impacto dos efeitos direcionais quando a soja está com aproximadamente 50 dias. O impacto em outras variedades e anos-safra é apresentado sucintamente na Tabela 4.5.

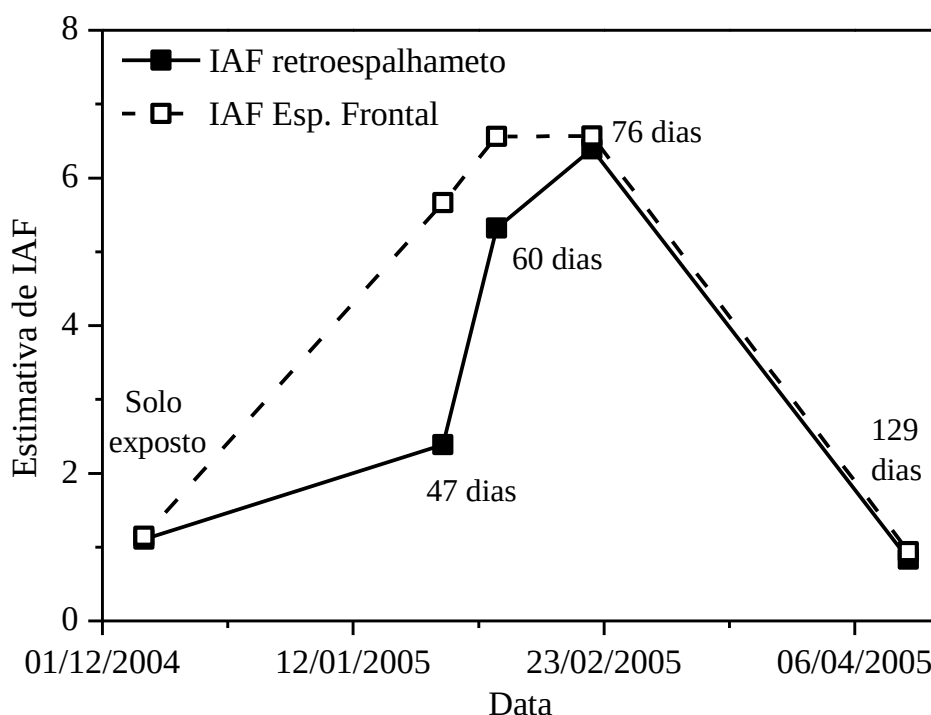


Figura 4.50 - Estimativas de IAF para a variedade Monsoy 8914 (fazenda Mutum; ano-safra 2004-2005) feitas utilizando o modelo empírico “global”. As estimativas foram plotadas para pares de imagens adquiridas em um mesmo estágio fenológico e com direções de visada opostas (Tabela 3.5).

Tabela 4.5 – Diferenças de NDVI e IAF calculado pelo modelo empírico “global” para pares de imagens adquiridas em dias próximos (mesmo estágio de desenvolvimento), mas com direções de visada opostas (retroespalhamento e espalhamento frontal).

Variedade Emgopa cultivada no ano-safra 2004-2005 na fazenda Mutum							
Data*	Ângulo (°)**	NDVI	NDVI	IAF	IAF	DAP	R
		Retroesp.	Esp. Frontal	Retroesp	Esp. Frontal	***	****
08/12/2004	05,15	0,2985	0,3443	0,7158	0,8944	0	<1
27/01/2005	31,55	0,3047	0,4255	0,7409	1,0738	28	≈1
05/02/2005	41,91	0,5135	0,6044	1,2971	2,4341	37	1
21/02/2005	42,29	0,6988	0,7827	4,6657	6,2307	53	2
12/04/2005	56,30	0,5717	0,5740	1,8764	1,9098	103	6
15/04/2005	04,69	0,3663	0,4466	0,9646	1,0981	106	6
Variedade Monsoy 8914 cultivada no ano-safra 2004-2005 na fazenda Anta							
08/12/2004	05,15	0,4511	0,4749	1,1039	1,1461	0±4	<1
27/01/2005	31,55	0,6019	0,7444	2,3843	5,6615	47	1
05/02/2005	41,91	0,7273	0,8500	5,3213	6,5639	60	3
21/02/2005	42,29	0,8004	0,8552	6,3923	6,5662	76	4
15/04/2005	04,69	0,3289	0,3565	0,8371	0,9353	129	8
Variedade Emgopa cultivada no ano-safra 2005-2006 na fazenda Mutum							
22/12/2005	41,23	0,4259	0,5617	1,0743	1,7398	4	<1
16/01/2006	50,34	0,4807	0,5071	1,1608	1,2621	29	≈1
25/01/2006	56,85	0,5680	0,6280	1,8231	2,9310	38	1
23/01/2006	42,40	0,4903	0,5553	1,1905	1,6604	36	1
27/04/2006	19,28	0,3148	0,3748	0,7816	0,9873	130	8
Variedade Uirapuru cultivada no ano-safra 2005-2006 na fazenda Mutum							
22/12/2005	41,23	0,5411	0,6409	1,5090	3,2313	7	<1
16/01/2006	50,34	0,4943	0,5426	1,2051	1,5239	32	≈1
21/01/2006	20,20	0,5162	0,5391	1,3137	1,4896	37	1
25/01/2006	56,85	0,6048	0,6595	2,4409	3,6842	41	1
23/01/2006	42,40	0,5408	0,5895	1,5064	2,1593	39	1
27/04/2006	19,28	0,2906	0,2912	0,6851	0,6874	133	8

* Apenas a data do retroespalhamento foi indicada.

** O valor do ângulo na refere-se à imagem do retroespalhamento. A imagem do espalhamento frontal apresentou um ângulo similar, na direção oposta.

*** DAP = Dias após o plantio.

**** Estádio reprodutivo estimado a partir do modelo apresentado por Ontario Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs - OMAFRA (2001).

4.3.3 Espacialização do impacto dos efeitos direcionais sobre as estimativas de IAF através do modelo empírico “global” e “local”

Para avaliar o impacto dos efeitos direcionais nas estimativas de IAF resultantes dos modelos empíricos, a variedade Emgopa, predominante na fazenda Mutum (Figura 3.2), foi selecionada para avaliar espacialmente esses efeitos. As estimativas de IAF baseadas nas regressões da Figura 4.47, aplicadas sobre o NDVI, obtido de imagens adquiridas em dias consecutivos (21 e 22 de fevereiro de 2005), com ângulos de visada opostos (42° e -44° , respectivamente), são apresentadas na Figura 4.51. As estimativas de IAF sobre a fazenda Mutum usando o modelo empírico “global” confirmaram a predominância de valores de IAF mais elevados na direção do espalhamento frontal (matiz avermelhada na Figura 4.51 b) em relação aos valores de IAF determinados a partir da imagem de retroespalhamento (Figura 4.51 a).

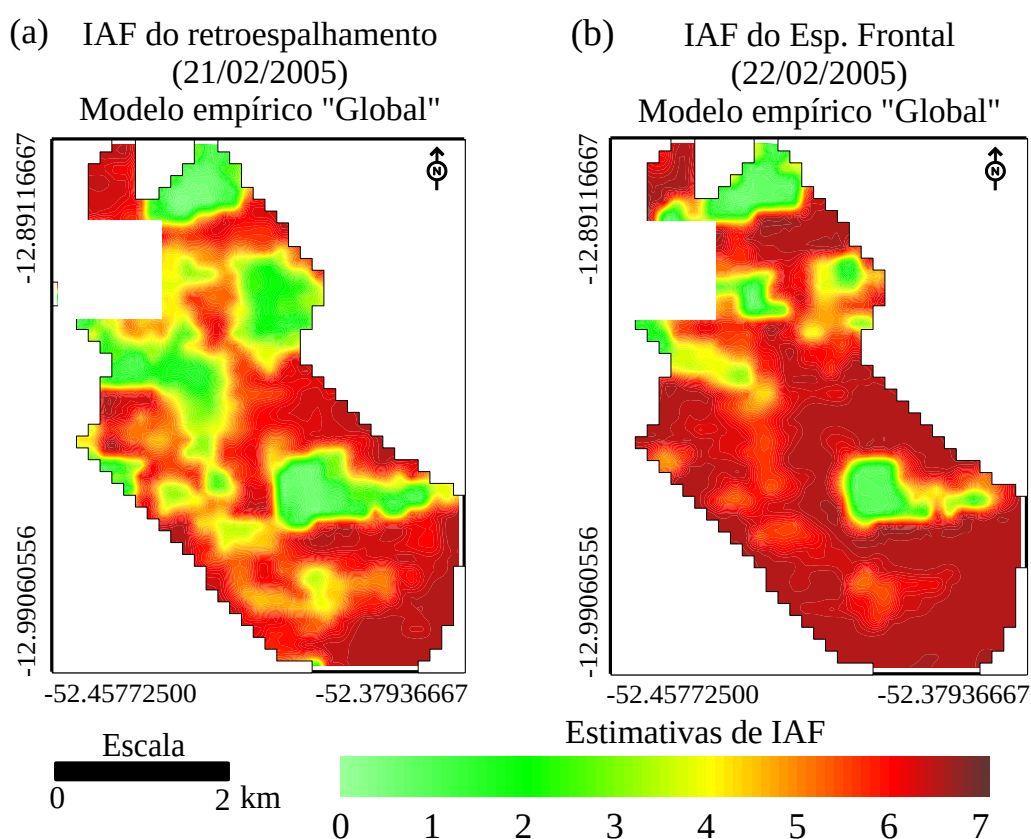


Figura 4.51 – Variabilidade espacial do IAF (fazenda Mutum) estimado para um mesmo estágio fenológico através de relações empíricas na direção do (a) retroespalhamento e (b) espalhamento frontal.

Em valores absolutos, as diferenças entre as estimativas de IAF atribuídas à direção de espalhamento atingiram valores de 3,2 (Figura 4.52 a) para o modelo empírico “global” e 1,5 (Figura 4.52 b) para o modelo empírico “local”. Em ambos os casos, verificou-se a importância dos efeitos direcionais sobre as estimativas de IAF feitas a partir do NDVI.

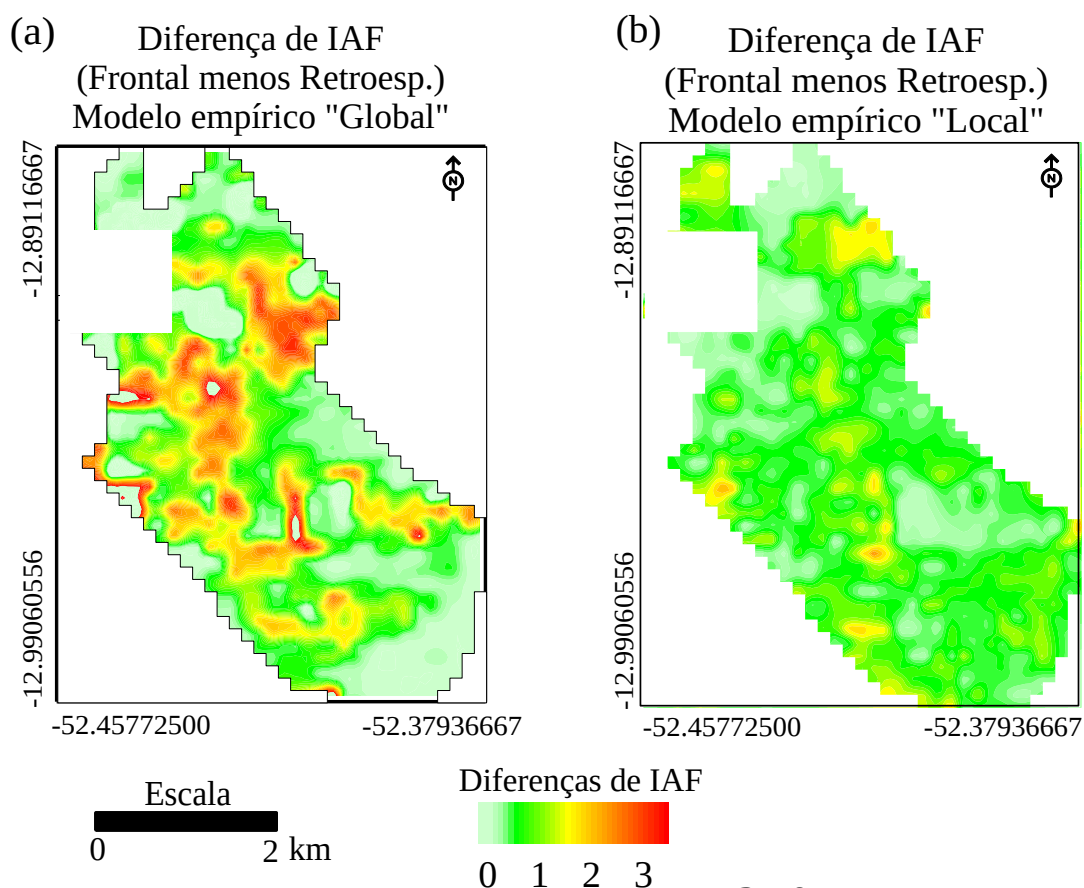


Figura 4.52 – Diferenças entre as estimativas de IAF feitas em ambas as direções para o modelo empírico (a) “global” e (b) “local”.

4.4 Discussão integrada dos resultados

Através do uso combinado de dados de alta resolução temporal do MODIS, juntamente com a média resolução espacial e alta resolução espectral do Hyperion foi possível caracterizar adequadamente a evolução espectral e angular de variedades de soja, considerando diferentes estações de crescimento. Em paralelo, o ajuste do modelo de transferência radiativa em folhas e dossel PROSAIL (JACQUEMOUD et al., 2006;

JACQUEMOUD et al., 2009) permitiu a exploração de uma ampla combinação em termos de geometria de iluminação e de visada em função do IAF. Apesar de apresentar valores diferentes, a variação da resposta espectral de outras culturas agrícolas e áreas florestais foi altamente dependente dos efeitos direcionais (AZV, AZS e AAR) (COLWELL, 1974; JACKSON et al., 1979; WALTER-SHEA, NORMAN, 1989; LIESENBERG et al., 2007).

Os resultados das simulações com o PROSAIL concordaram com as medidas reais de reflectância do sensor multiespectral MODIS e do hiperespectral Hyperion. Entretanto, a simulação dos efeitos direcionais no PROSAIL foi subestimada em comparação com dados reais do MODIS (seção 4.1.7). Esse resultado pode ser consequência da definição do fator hot spot no PROSAIL, visto que este fator determina o impacto do hot spot e pode ser interpretado de forma similar ao parâmetro curtose (estatística), com um maior (hspot mais alto = platicúrtica) ou menor (hspot mais baixo = leptocúrtica) espalhamento lateral do efeito de hot spot. Novos estudos são necessários para gerar resultados conclusivos sobre este efeito.

A utilização do conjunto de produtos MODIS requer uma avaliação da qualidade dos dados e dos efeitos direcionais. Independente do estágio fenológico, os valores de reflectância na direção do retroespalhamento sempre tendem a ser superiores aos valores obtidos na direção do espalhamento frontal. No primeiro caso ocorre uma predominância de componentes iluminados sendo vistos pelo sensor e no segundo caso, o sensor tende a ver a projeção da sombra (espalhamento frontal). Como as características espectrais da vegetação são dependentes do comprimento de onda, alguns índices de vegetação podem ser mais ou menos influenciados. Em geral, o NDVI apresentou melhores resultados, ou seja, foi menos sensível aos efeitos direcionais à medida que o IAF da soja aumentou (seção 4.2 ; Apêndice C). Com base exclusivamente nas simulações com o PROSAIL, o GNDVI apresentou comportamento similar ao NDVI (Figura 4.18 e Figura 4.24 a).

Estimativas de IAF derivadas de índices de vegetação foram altamente sensíveis aos efeitos direcionais (seção 4.3). Modelos empíricos que exploram a relação entre NDVI

e IAF podem apresentar resultados menos afetados pelos efeitos direcionais quando ajustados localmente. Por outro lado, não são replicáveis para outras regiões, dificultando a geração de estimativas em escala nacional ou global. Em geral, o maior impacto sobre o IAF ocorre para valores de NDVI entre 0,70 e 0,85 devido ao comportamento não linear da relação entre NDVI e IAF. Esse intervalo (faixa crítica) corresponde à região da equação de regressão com comportamento próximo do assintótico (BREUNIG et al., 2011). Desta forma, os limites dessa faixa crítica podem oscilar de acordo com o modelo empírico elaborado. O EVI, por apresentar alta correlação com a banda do IVP (R^2 de 0,72), foi altamente afetado pelos efeitos direcionais, seguido dos NDWIs modificados.

Entre as principais aplicações do sensoriamento remoto (agrícola) está a classificação de culturas. Conforme indicado por Goel e Reynolds (1989), classificações baseadas nas bandas do visível e do IVP são dependentes dos ângulos de iluminação (zenital e azimutal), visto que provocam mudanças nas características espectrais do dossel. Assim, a hipótese de que os efeitos direcionais afetam as classificações deve ser considerada, conforme demonstrado por Galvão et al. (2009). Os resultados da classificação de variedades de soja com base em imagens do sensor hiperespectral Hyperion na fazenda Tanguro mostraram que a acurácia das classificações baseadas em simulações de sensores multiespectrais (AVHRR, Landsat, Ikonos, etc.) diminuiu em função do número de bandas utilizadas (Apêndice A, pág. 153). Apesar de não ter sido avaliado o impacto do ângulo zenital de visada (AZV), os resultados da seleção de atributos (WITTEN; FRANK, 2005; HALL et al., 2009) mostraram que as bandas do verde, da borda vermelha e do IVP representaram adequadamente a variância dos dados. Assim, conforme discutido no decorrer deste trabalho, essas bandas foram afetadas pelos efeitos direcionais. Consequentemente, os resultados das classificações dependerão das imagens utilizadas (maior ou menor variância).

Galvão et al. (2010) exploraram o impacto da geometria de visada (sensor Hyperion) sobre as estimativas de produtividade da soja baseadas na reflectância e índices de vegetação. Os resultados mostraram uma melhora significativa das correlações quando os dados são provenientes da direção do retroespalhamento (maior variância interna foi

encontrada). Quando são utilizadas imagens da direção do espalhamento frontal, os resultados apresentaram significativa piora (Anexo A, pág. 197). A avaliação detalhada dos efeitos do ângulo de visada MODIS sobre os dados de reflectância, NDVI e estimativas de IAF foi apresentada por Breunig et al. (2011; Apêndice B, pág. 167).

5 CONCLUSÕES

Os resultados apresentados no decorrer deste trabalho mostraram a importância dos efeitos direcionais sobre a reflectância dos dosséis de soja. Em geral, a reflectância na direção do retroespalhamento, com predominância de componentes iluminados sendo vistos pelo sensor, foi superior à reflectância na direção do espalhamento frontal (sombra) para a banda do IVP, chegando a diferenças de até 20%. Consequentemente, os índices de vegetação e as estimativas de IAF através de modelos empíricos apresentaram forte dependência da geometria de iluminação e visada.

Através das simulações com o PROSAIL, com o modelo ajustado para um dossel de soja, os efeitos dos parâmetros geométricos de iluminação e de visada sobre a reflectância foram demonstrados para diferentes valores de IAF. O ângulo azimutal relativo (AAR) apresentou maior influência para ângulos próximos ao grau zero na direção do retroespalhamento (plano principal de espalhamento). O impacto do ângulo zenital de visada (AZV) e do ângulo zenital solar (AZS) sobre a reflectância apresentou forte influência do efeito hot spot (na direção do retroespalhamento). Em geral, a reflectância na direção do retroespalhamento sempre foi maior do que na direção do espalhamento frontal. Em relação aos índices de vegetação, o NDVI foi o índice que apresentou uma menor sensibilidade aos efeitos direcionais à medida que o IAF aumentou. Nos demais índices esse comportamento não foi verificado claramente, sendo que o GNDVI apresentou o comportamento mais próximo do obtido com o NDVI.

Apesar das diferenças serem reduzidas com o avanço do desenvolvimento da soja, a reflectância na direção do retroespalhamento manteve-se mais elevada ao longo de todo ciclo da soja nos dois anos-safra estudados (2004-2005 e 2005-2006). Em geral, as variações na reflectância associadas à dinâmica fenológica da soja foram inferiores às diferenças na reflectância atribuídas aos efeitos direcionais para a variedade Peridz e o contrário foi verificado para variedade Monsoy 9010. Para a variedade Perdiz (fazenda Tanguro), as diferenças atribuídas à sucessão de estádios fenológicos atingiram até 4%, enquanto que as diferenças atribuídas aos ângulos zenitais de visada do MODIS

chegaram a 20% na banda do IVP (841-876 nm). Em relação a variedade Monsoy 9010, que apresentou estádios fenológicos distintos entre si, as variações da reflectância da banda do IVP em função do estágio fenológico foram da ordem de 25% e em função dos efeitos direcionais de aproximadamente 15%.

Apesar de a reflectância das imagens adquiridas na direção do retroespalhamento ter sido superior à reflectância no espalhamento frontal, os valores do NDVI na direção do espalhamento frontal foram maiores do que os valores calculados para a direção do retroespalhamento, ocorrendo o contrário para o EVI. Essas diferenças foram maiores nos estádios iniciais e foram reduzidas com o aumento do IAF (PROSAIL) e o fechamento do dossel, de acordo com os dias após o plantio (MODIS). Esse resultado deve-se à maior influência da banda do vermelho na determinação do NDVI e à maior influência da banda do IVP no cálculo do EVI.

A avaliação das faixas de ângulo de visada do MODIS mostrou que para AZV inferiores a 25° as diferenças no NDVI calculado para direções opostas e dias consecutivos não foram significativas. Para AZV superiores a 25° os resultados mostram diferenças estatisticamente significativas.

Verificou-se que índices de vegetação com o NDVI e o GNDVI foram menos afetados pelos efeitos direcionais do que o EVI e os outros dois índices que utilizaram bandas do IVP e do SWIR ($NDWI_{1640}$ e $NDWI_{2120}$). O NDVI apresentou as menores diferenças entre as direções do retroespalhamento e do espalhamento frontal considerando um estágio fenológico fixo (imagens MODIS adquiridas em dias consecutivos).

O algoritmo principal do MODIS (baseado em um modelo de transferência radiativa) utilizado para gerar as estimativas de IAF gradualmente falhou com o desenvolvimento da soja nos dois anos-safra estudados, considerando as quatro fazendas estudadas. Em outras palavras, a frequência de valores dos pixels de IAF (produto MOD15A2) calculados pelo algoritmo backup (modelo empírico da relação entre IAF e NDVI) gradualmente aumentou com o fechamento do dossel, atingindo um valor de até 94% entre janeiro e fevereiro. Na região estudada, estes meses coincidem com o período de maior cobertura de nuvens. Além de existirem vários outros fatores que podem afetar a

qualidade das estimativas de IAF (p.ex. classificação errônea do bioma, saturação da reflectância e a dependência da escala), a alta reflectância (acima de 50%) no IVP no período de dossel fechado e as incertezas nos dados de reflectância utilizados pelo algoritmo principal podem explicar a alta frequência de falhas. Assim, o modelo backup passou a assumir importância crescente. Contudo, investigações futuras mais aprofundadas são necessárias para explicar plenamente as causas da falha do algoritmo principal do MODIS na estimativa do IAF.

Considerando as composições 8-dias do produto IAF (MOD15A2), verificou-se a predominância de pixels estimados com base em imagens do espalhamento frontal. Este fato é devido ao maior valor de NDVI nessa direção e ao uso do procedimento de máximo valor para compor as imagens 8-dias. O impacto dos efeitos direcionais sobre as estimativas de IAF derivados da relação entre NDVI e IAF foi maior exatamente no pico de desenvolvimento da soja. Para um determinado estágio fenológico (imagens adquiridas em dias consecutivos) as diferenças do NDVI atingiram valores de até 0,13, considerando imagens do espalhamento frontal menos as do retroespalhamento, em dosséis de soja bem desenvolvidos (fechado).

Quando o NDVI foi utilizado para estimar o IAF através de um modelo empírico “global”, variações do IAF estimado de até 3,2 foram encontradas para a variedade Emgopa, cultivada na fazenda Mutum. Quando o modelo empírico “local”, derivado da relação entre NDVI e IAF estimado pelo algoritmo principal do MODIS foi utilizado, as diferenças máximas foram reduzidas para valores de IAF de até 1,5. Verificou-se que as maiores variações nas estimativas de IAF através de modelos empíricos baseados no NDVI ocorrem no intervalo de NDVI entre 0,70 e 0,85. Apesar do melhor resultado atingido pelo modelo empírico “local” em relação ao modelo empírico “global”, os efeitos direcionais ainda foram significativos e devem ser considerados.

Finalmente, a necessidade de investigar mais as relações entre a reflectância e índices de vegetação, e as relações dos modelos de estimativa de parâmetros biofísicos com os efeitos direcionais (geometria de iluminação e visada) ficou evidente na presente pesquisa. Além disso, é necessário buscar avaliar os impactos do AZV e do AZS sobre

o IAF, outros tipos de vegetação e, possivelmente sobre os modelos agrometeorológico-espectrais, visto que parte dos erros de previsões de safra e estimativa de produtividade pode estar associada à superestimava/subestimativa do IAF (ou outros parâmetros biofísicos da vegetação) utilizado como entrada (*input*).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGRICULTURAL RESEARCH SERVICE (ARS). **Winsail user guide**: scattering by arbitrarily inclined leaves (SAIL) model. Greenbelt: USDA-ARS Hydrology and Remote Sensing Laboratory, 2006. 31 p.
- ALEXANDRIDIS, T. K.; GITAS, I. Z.; SILLEOS, N. G. An estimation of the optimum temporal resolution for monitoring vegetation condition on a nationwide scale using MODIS/Terra data. **International Journal of Remote Sensing**, v. 29, n. 11-12, p. 3589–3607, jun. 2008.
- APARICIO, N.; VILLEGAS, D.; ROYO, C.; CASADEUS, J.; ARAUS, J. L. Effect of sensor view angle on the assessment of agronomic traits by ground level hyper-spectral reflectance measurements in durum wheat under contrasting Mediterranean conditions. **International Journal of Remote Sensing**, v. 25, n. 6, p. 1131-1152, mar. 2004.
- ARVOR, D.; DUBREUIL, V.; VILLAR, P. M.; FERREIRA, C. M.; MEIRELLES, M. S. P. Développement, crises et adaptation des territoires du soja au Mato Grosso: l'exemple de Sorriso. **Confins - Revue Franco-Brésilienne de Géographie**, n. 6, p. 1-23, jul. 2009.
- ASNER, G. P.; BRASWELL, B. H.; SCHIMEL, D. S.; WESSMAN, C. A. Ecological Research needs from multiangle remote sensing data. **Remote Sensing of Environment**, v. 63, n. 2, p. 155-165, mar. 1998.
- ATZBERGER, C. Inverting the PROSAIL canopy reflectance model using neural nets trained on streamlined databases. **Journal of Spectral Imaging**, v. 1, n. a2, p. 1-13, nov. 2010.
- BARET, F.; FOURTY, T. Estimation of leaf water content and specific leaf weight from reflectance and transmittance measurements. **Agronomie**, v. 17, n. 9-10, p. 455-464, 1997.
- BARET, F.; HAGOLLE, O.; GEIGER, B.; BICHERON, P.; MIRAS, B.; HUC, M.; BERTHELO, T. B. A.; NIÑO, F.; WEISS, M.; SAMAIN, O.; ROUJEAN, J. L.; LEROY, M. LAI, fAPAR and fCover CYCLOPES global products derived from VEGETATION: Part 1: Principles of the algorithm. **Remote Sensing of Environment**, v.110, n.3, p.275-286, out. 2007b.
- BARET, F.; HOULES, V.; GUERIF, M. Quantification of plant stress using remote sensing observations and crop models: the case of nitrogen management. **Journal of Experimental Botany**, v.58, n.4, p.869-880, jan. 2007a.
- BARNESLEY, M. J.; ALLISON, D.; LEWIS, P. On the information content of multiple view angle (MVA) images. **International Journal of Remote Sensing**, v.18, n.9, p.1937-1960, jun. 1997.

- BARRY, P. **EO-1/ Hyperion science data user's guide**. Redondo Beach, CA: TRW Space, Defense & Information Systems, 2001. 65 p. CAGE, No. 11982, n. HYP.TO.01.077, Rev Public Release L1_B.
- BEN-DOR, E.; IRONS, J. R.; EPEMA, G. F. Soil reflectance. In: RENCZ, A. N. (Ed.). **Remote sensing for the Earth science: manual of remote sensing**. 3rd ed. New York: John Willey & Sons, Inc, 1999. cap. 3, p.111-188.
- BLACKBURN, G. A. Hyperspectral remote sensing of plant pigments. **Journal of Experimental Botany**, v. 58, n. 4, p. 855-867, jul. 2006.
- BLAD, B. L.; BAKER, D. G. Orientation and distribution of leaves within soybean canopies. **Agronomy Journal**, v. 64, p. 26-29, 1972.
- BOUSQUET, L.; LACHERADE, S.; JACQUEMOUD, S.; MOYA, I. Leaf BRDF measurements and model for specular and diffuse components differentiation. **Remote Sensing of Environment**, v. 98, n. 2-3, p. 201-211, out. 2005.
- BREUNIG, F. M.; GALVÃO, L. S.; FORMAGGIO, A. R.; EPIPHANIO, J. C. N. LAI retrievals over brazilian soybean areas using MODIS/Terra data. In: AGU 2010 The Meeting of the Americas, 2010, Foz do Iguaçu. **Proceedings...** Foz do Iguaçu: AGU, 2010. p. ID 2595.
- BREUNIG, F. M.; GALVÃO, L. S.; FORMAGGIO, A. R.; EPIPHANIO, J. C. N. Directional effects on NDVI and LAI retrievals from MODIS: A case study in Brazil with soybean. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 13, n. 1, p. 34-42, feb. 2011.
- CAMPOS, R. C. **Modelo de transferência radiativa para dosséis descontínuos regulares (GRART): aplicação para dosséis de café**. 2008. 154 p. (INPE-15678-TDI/1452). Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. Disponível em: <<http://urlib.net/sid.inpe.br/mtc-m18@80/2009/02.06.17.52>>. Acesso em: 01 ago. 2009.
- CASA, R. **Multiangular remote sensing of crop canopy structure for plant stress monitoring**, 2003. 271 p. Tese (Environmental and Applied Biology) – University of Dundee (UD), Dundee, 2003.
- CECCATO, P. Detecting vegetation leaf water content using reflectance in the optical domain. **Remote Sensing of Environment**, v. 77, n. 1, p. 22-33, jul. 2001.
- CENTER FOR OCEAN-LAND-ATMOSPHERE STUDIES (COLA). **Grid analysis and display system (GrADS)**. Calverton, MD: COLA, 2009.
- CHEN, J. M.; CIHLAR, J. A hotspot function in a simple bidirectional reflectance model for satellite applications. **Journal of Geophysical Research**, v. 102, n. D22, p. 25907-25913, 1997.

- CHEN, D.; HUANG, J.; JACKSON, T. J. Vegetation water content estimation for corn and soybeans using spectral indices derived from MODIS near- and short-wave infrared bands. **Remote Sensing of Environment**, v. 98, n. 2-3, p. 225-236, out. 2005.
- CHEN, J. M.; LIU J.; LEBLANC, S. G.; LACAZE R.; ROUJEAN J. L. Multi-angular optical remote sensing for assessing vegetation structure and carbon absorption. **Remote Sensing of Environment**, v. 84, n. 4, p. 516-525, abr. 2003.
- CIHLAR, J.; MANAK, D.; VOISIN, N. AVHRR bidirectional reflectance effects and compositing. **Remote Sensing of Environment**, v. 48, n. 1, p. 77-88, abr. 1994.
- COLWELL, J.E. Vegetation canopy reflectance. **Remote Sensing of Environment**, v. 3, n. 3, p. 175-183, 1974.
- COMBES, D.; BOUSQUET, L.; JACQUEMOUD, S.; SINOQUET, H.; VARLET-GRANCHER, C.; MOYA, I. A new spectrogoniophotometer to measure leaf spectral and directional optical properties. **Remote Sensing of Environment**, v. 109, n. 1, p. 107-117, jul. 2007.
- COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (CONAB). **Safras – Grãos:** séries históricas da soja. 11_01_19_16_16_35_sojaseriehist.xls. Brasília: Companhia Nacional de Abastecimento, 2010. Séries históricas relativas às safras 1976/77 a 2009/2010 de área plantada, produtividade e produção. Disponível em: < <http://www.conab.gov.br/conabweb/index.php?PAG=1> >. Acesso em 30 out. 2010. Acesso em: 27 jan. 2011.
- CORRÊA, J. C. Efeito de sistemas de cultivo na estabilidade de agregados de um Latossolo Vermelho-Amarelo em Querência, MT. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 37, n. 2, p. 203-209, fev. 2002.
- CURRAN, P. J.; WINDHAM, W. R.; GHOLZ, H. L. Exploring the relationship between reflectance red edge and chlorophyll concentration in slash pine leaves. **Tree Physiology**, v. 15, n. 3, p. 203-206, dec. 1995.
- DALL'AGNOL, A.; HIRAKURI, M. H. Realidade e perspectivas do Brasil na produção de alimentos e agroenergia, com ênfase na soja. **Circular Técnica**, n. 59, 8 p. Londrina: EMBRAPA Soja, 2008. ISSN 2176-286.
- DAUDET, F. A.; TCHAMITCHIAN, M. Radiative exchange and photosynthesis. In: VARLET-GRANCHER, C.; BONHOMME, R.; SINOQUET, H. (Eds.). **Crop structure and light microclimate:** characterization and applications, INRA edn., Versailles Cedex, France, 1993. p. 401-417.
- DI VITTORIO, A. V. Enhancing a leaf radiative transfer model to estimate concentrations and in vivo specific absorption coefficients of total carotenoids and chlorophylls a and b from single-needle reflectance and transmittance. **Remote Sensing of Environment**, v. 113, n. 9, p. 1948-1966, sep. 2009.

DINER, D. J.; ASNER, G. P.; DAVIES, R.; MULLER, J. P.; PINTY, B.; SCHAAF, C. B.; STROEVE, J. New directions in Earth observing: scientific applications of multiple-view-angle remote sensing. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 80, n. 11, p. 2209-2228, 1999.

DORAISWAMY, P. C.; SINCLAIR, T. R.; HOLLINGER, S.; AKHMEDOV, B.; STERN, A.; PRUEGER, J. Application of MODIS derived parameters for regional crop yield assessment. **Remote Sensing of Environment**, v. 97, n. 2, p. 192-202, jul. 2005.

DWYER, J.; SCHMIDT, G. The MODIS reprojection tool. In: QU, J. J.; Gao, W.; KAFATOS, M.; MURPHY, R. E.; SALOMONSON, V. V. **Earth Science Satellite Remote Sensing**, Berlin: Springer, 2006. cap. 13, p. 162-177.

EFRON, B. **The Jackknife, the bootstrap and other resampling plans**. Philadelphia, PA: Society for Industrial and Applied Mathematics, 100 p. 1982.

ELVIDGE, C. D. Visible and near infrared reflectance characteristics of dry plant materials. **International Journal of Remote Sensing**, v.11, n.10, p.1775-1795, oct. 1990.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – SOJA (EMBRAPA-SOJA). **Soja**. EMBRAPA. Londrina: Embrapa-Soja, 2009. Disponível em: < <http://www.cnpso.embrapa.br/index.php> >. Acesso em: 29 out. 2009.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – SOJA (EMBRAPA-SOJA). **Tecnologias de produção de soja - região central do Brasil 2004**. Londrina: Embrapa Soja, 2000. Sistemas de Produção, n.1, Disponível em: < <http://www.cnpso.embrapa.br/producaosoja/> >. Acesso em: 29 out. 2009.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA SOJA). **Tecnologias de produção de soja - região central do Brasil 2009 e 2010: Sistemas de Produção 13**. Londrina: Embrapa Soja, 2008. 262 p. Disponível em: < <http://www.cnpso.embrapa.br/download/Tecnol2009.pdf> >. Acesso em: 26 out. 2009

EPIPHANIO, J. C. N.; HUETE, A. R. Dependence of NDVI and SAVI on sun/sensor geometry and its effect on fAPAR relationships in alfalfa. **Remote Sensing of Environment**, v. 51, n. 3, p. 351-360, mar. 1995.

EUROPEAN SPACE AGENCY (ESA). **Compact high resolution imaging spectrometer – CHRIS**: ESA's Official CHRIS-PROBA page. ESA Communications. Disponível em: < http://www.esa.int/esaMI/Proba_web_site/index.html >. Acesso em: 3 nov. 2009.

FANG, H. L.; LIANG, S. L.; HOOGENBOOM, G.; TEASDALE, J.; CAVIGELLI, M. Corn-yield estimation through assimilation of remotely sensed data into the CSM-CERES- Maize model. **International Journal of Remote Sensing**, v. 29, n. 10, p. 3011–3032, mar. 2008.

FARIAS, J. R. B.; NEPOMUCENO, A. L.; NEUMAIER, N. Ecofisiologia da soja. **Circular Técnica**, n. 48, 9 p. Londrina: EMBRAPA Soja, 2007. ISSN: 1516-7860.

FEHR, W. R.; CAVINESS, C. E. **Stages of soybean development**. n. 80, 11 p. Ames, IA, USA: Iowa State University of Science and Technology -Agricultural and Home Economics Experiment Station, 1977. Serie Special Report.

FÉRET, J.B.; FRANÇOIS, C.; ASNER, G.P.; GITELSON, A.A.; MARTIN, R.E.; BIDEL, L.P.R.; USTIN, S.L.; LE MAIRE, G.; JACQUEMOUD, S. PROSPECT-4 and 5: advances in the leaf optical properties model separating photosynthetic pigments. **Remote Sensing of Environment**, v. 112, n. 6, p. 3030-3043, jul. 2008.

FOURTY, T.; BARET, F.; JACQUEMOUD, S.; SCHMUCK, G.; VERDEBOUT, J. Leaf optical properties with explicit description of its biochemical composition: direct and inverse problems. **Remote Sensing of Environment**, v. 56, n. 2, p. 104-117, maio 1996.

FRANCHINI, J. C.; TORRES, E.; GONÇALVES, S. L.; SARAIVA, O. F. Contribuição do sistema de manejo do solo para a produção sustentável da soja. **Circular Técnica**, n. 46, 10 p. Londrina: Embrapa-Soja, 2007. ISSN: 1516-7860.

FRANCHITO, S. H.; BRAHMANANDA RAO, V.; VASQUES, A. C.; SANTO, C. M. E.; CONFORTE, J. C. Validation of TRMM precipitation radar monthly rainfall estimates over Brazil. **Journal of Geophysical Research**, v. 114, n. D02105, p. 1-9, 2009. DOI:10.1029/2007JD009580.

FRITSCHI, F. B.; RAY, J. D. Soybean leaf nitrogen, chlorophyll content, and chlorophyll a/b ratio. **Photosynthetica**, v. 45, n. 1, p. 92-98, 2007.

GALVÃO, L. S.; FORMAGGIO, A. R.; TISOT, D. A. Discrimination of sugarcane varieties in southeastern Brazil with EO-1 Hyperion data. **Remote Sensing of Environment**, v. 94, n. 4, p. 523-534, fev. 2005.

GALVÃO, L. S.; ROBERTS, D. A.; FORMAGGIO, A. R.; NUMATA, I.; BREUNIG, F. M. View angle effects on the discrimination of soybean varieties and on the relationships between vegetation indices and yield using off-nadir Hyperion data. **Remote Sensing of Environment**, v. 113, n. 4, p. 846-856, abr. 2009.

GAMON, J. A.; SERRANO, L.; SURFUS, J. S. The photochemical reflectance index: an optical indicator of photosynthetic radiation use efficiency across species, functional types, and nutrient levels. **Oecologia**, v. 112, n. 4, p. 492-501, 1997.

GAO, B. C.; HEIDEBRECHT, K. B.; GOETZ, A. F. H. Derivation of scaled surface reflectances from AVIRIS data. **Remote Sensing of Environment**, v. 44, n. 2-3, p. 165-178, 1993.

GAO, B. C. NDWI – a normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. **Remote Sensing of Environment**, v. 58, n. 3, p.

257-266, dez.1996.

GAO, X.; HUETE, A.; DIDAN, K. Multisensor comparisons and validation of MODIS vegetation indices at the semiarid Jornada experimental range. **IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing**, v. 41, n. 10, p. 2368-2381, out. 2003.

GARCIA, A.; PÍPOLO, A. E.; LOPES, I. O. N.; PORTUGAL, F. A. F. Instalação da lavoura de soja: época, cultivares, espaçamento e população de plantas. **Circular Técnica**, n. 51, 12 p. Londrina: EMBRAPA-Soja, 2007. ISSN: 1516-7860.

GARRIGUES, S.; ALLARD, D.; BARET, F.; WEISS, M. Influence of landscape spatial heterogeneity on the non-linear estimation of leaf area index from moderate spatial resolution remote sensing data. **Remote Sensing of Environment**, v. 105, n. 4, p. 286-298, 2006.

GITELSON, A. A. Wide dynamic range vegetation index for remote quantification of biophysical characteristics of vegetation. **Journal of Plant Physiology**, v. 161, n. 2, p. 165-173, 2004.

GITELSON, A. A.; KAUFMAN, Y. J.; STARK, R.; RUNDQUIST, D. Novel algorithms for remote estimation of vegetation fraction. **Remote Sensing of Environment**, v. 80, n. 1, p. 76-87, 2002b.

GITELSON, A. A.; MERZLYAK, M. N.; LICHTENTHALER, H. K. Detection of red edge position and chlorophyll content by reflectance measurements near 700 nm. **Journal of Plant Physiology**, v. 148, n. 3-4, p. 501-508, 1996.

GITELSON, A. A.; ZUR, Y.; CHIVKUNOVA, O. B.; MERZLYAK, M. N. Assessing carotenoid content in plant leaves with reflectance spectroscopy. **Photochemistry and Photobiology**, v. 75, n. 3, p. 272-281, 2002a.

GOBRON, N.; PINTY, B.; VERSTRAETE, M. M.; WIDLÓWSKI, J. L.; DINER, D. J. Uniqueness of multiangular measurements. II. Joint retrieval of vegetation structure and photosynthetic activity from MISR. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 40, n. 7, p. 1574-1592, 2002.

GOEL, N. S. Models of vegetation canopy reflectance and their use in estimation of biophysical parameters from reflectance data. **Remote Sensing Reviews**, v. 4, n. 1, p. 1-212, 1988.

GOEL, N. S.; REYNOLDS, N. E.. Bidirectional canopy reflectance and its relationship to vegetation characteristics. **International Journal of Remote Sensing**, v. 10, n. 1, p. 107-132, 1989.

GOLDEN SOFTWARE INC. **Surfer®**: A powerful contouring, gridding, and surface mapping package for scientists and engineers. Version 8. Golden Software, Inc. 809 14th Street Golden, Colorado 80401-1866 USA., 2008

GONÇALVES, S. L.; GAUDENCIA, C. A.; FRANCHINI, C. A.; GALERANI, P. R.; GARCIA, A. Rotação de culturas. **Circular Técnica**, n. 45, 8 p. Londrina: Embrapa-Soja, 2008. ISSN: 1516-7860.

GOODENOUGH, D. G.; DYK, A.; NIEMANN, O.; PEARLMAN, J. S.; CHEN, H.; HAN, T.; MURDOCH, M.; WEST, C. Processing Hyperion and ALI for forest classification. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 41, n. 6, p. 1321-1331, 2003.

GOWER, S. T.; KUCHARIK, C. J.; NORMAN, J. M. Direct and indirect estimation of leaf area index, fAPAR, and net primary production of terrestrial ecosystems. **Remote Sensing of Environment**, v. 70, n. 1, p. 29-51, 1999.

HABOUDANE, D.; MILLER, J. R.; PATTEY, E.; ZARCO-TEJADA, P. J.; STRACHAN, I. B. Hyperspectral vegetation indices and novel algorithms for predicting green IAF of crop canopies: Modeling and validation in the context of precision agriculture. **Remote Sensing of Environment**, v. 90, n. 3, p. 337-352, 2004.

HABOUDANE, D.; MILLER, J.R.; TREMBLAY, N.; ZARCO-TEJADA, P.J.; DEXTRAZE, L. Integrated narrow-band vegetation indices for prediction of crop chlorophyll content for application to precision agriculture. **Remote Sensing of Environment**, v. 81, n. 2-3, p. 416-426, 2002.

HALL, D. K.; RIGGS, G. A.; SALOMONSON, V. V. **MODIS/Terra Snow Cover 8-day L3 Global 500m Grid V005**. Boulder, Colorado USA: National Snow and Ice Data Center. 2006. Disponível em:
< http://nsidc.org/data/docs/daac/modis_v5/mod10a2_modis_terra_snow_8-day_global_500m_grid.gd.html >. Acesso em: 1 nov. 2009.

HALL, M.; FRANK, E.; HOLMES, G.; PFAHRINGER, B.; REUTEMANN, P.; WITTEN, I. H. The WEKA data mining software: an update. **SIGKDD Exp.**, v. 11, p. 10-18, 2009. [doi: 10.1145/1656274.1656278].

HAPKE, B. Bidirectional reflectance spectroscopy 1. Theory. **Journal of Geophysics Research**, v.86, n. 4, p. 3039–3054, 1981.

HATFIELD, J. L.; CARLSON, R. E. Photosynthetically active radiation, CO₂ uptake, and stomatal diffusive resistance profiles within soybean canopies. **Agronomy Journal**, v. 70, n. 4, p. 592-596, 1978.

HEIFFIG, L. S.; CÂMARA, G. M. D. S.; MARQUES, L. A.; PEDROSO, D. B.; PIEDADE, S. M. D. S. Fechamento e índice de área foliar da cultura da soja em diferentes arranjos espaciais. **Bragantia**, v. 65, n. 2, p. 285-295, 2006.

HESTERBERG, T. C.; MOORE, D. S.; MONAGHAN, S.; CLIPSON, A.; EPSTEIN, R. **Bootstrap methods and permutation tests, software S-Plus**. Somerville, MA: TIBCO Software, 2008. Disponível em: < <http://www.insightful.com/products/splus/> >.

Acesso em: 2 nov. 2009.

HOLBEN, B.; FRASER, R. S. Red and near-infrared sensor response to off-nadir viewing. **International Journal of Remote Sensing**, v. 5, n. 1, p. 145-160, 1984.

HOUBORG, R.; SOEGAARD, H.; BOEGH, E. Combining vegetation index and model inversion methods for the extraction of key vegetation biophysical parameters using Terra and Aqua MODIS reflectance data. **Remote Sensing of Environment**, v. 106, n. 1, p. 39-58, 2007.

HU, B.; LUCHT, W.; STRAHLER, A. H.; BARKER SCHAAF, C.; SMITH, M. Surface albedos and angle-corrected NDVI from AVHRR observations of South America. **Remote Sensing of Environment**, v. 71, n. 2, p. 119-132, 2000.

HUETE, A. Extension of soil spectra to the satellite: atmospheric, geometric and sensor considerations. **Photo-Interprétation**, v. 34, n. 2, p. 101-114, 1996.

HUETE, A. R.; DIDAN, K.; MIURA, T.; RODRIGUEZ, E. P.; GAO, X.; FERREIRA, L. G. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. **Remote Sensing of Environment**, v. 83, n. 1-2, p. 195-213, nov. 2002.

HUETE, A.; JUSTICE, C.; LEEUWEN, W. **MODIS vegetation index (MOD 13): algorithm theoretical basis document**. Version 3. Tucson: NASA, 1999. Disponível em: < http://modis.gsfc.nasa.gov/data/atbd/atbd_mod13.pdf >. Acesso em: 1 nov. 2009.

HUNT, E. R.; ROCK, B. N. Detection of changes in leaf-water content using near-infrared and middle-infrared reflectances. **Remote Sensing of Environment**, v. 30, n. 1, p. 43-54, 1989.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA (INMET). **Normais climatológicas**. Brasília-DF: INMET, 2009. Disponível em: < www.inmet.gov.br >. Acesso em: 4 nov. 2009.

ITT. **ENVI™** - Environment for Visualizing for Images. ENVI User's guide. No Brasil - Porto Alegre (SulSoft®): ®ITT Visual Information Solutions, 2008.

JACKSON, R. D.; PINTER Jr., P. J.; IDSO, S. B.; REGINATO, R. J. Wheat spectral reflectance: interactions between crop configuration, sun elevation, and azimuth angle. **Applied Optics**, v. 18, n. 22, p. 3730-3732, 1979.

JACKSON, T.J.; CHEN, D.; COSH, M.; LI, F.; ANDERSON, M.; WALTHALL, C.; DORAISWAMY, P.; RAY HUNT, E. Vegetation water content mapping using Landsat data derived Normalized Difference Water Index for corn and soybeans. **Remote Sensing of Environment**, v. 92, n. 2-3, p. 475-482, out. 2004.

JACQUEMOUD, S.; BARET, F. PROSPECT: A model of leaf optical properties spectra. **Remote Sensing of Environment**, v. 34, n. 2, p. 75-91, nov. 1990.

- JACQUEMOUD, S.; USTIN, S. L.; VERDEBOUT, J.; SCHMUCK, G.; ANDREOLI, G.; HOSGOOD, B. Estimating leaf biochemistry using the PROSPECT leaf optical properties model. **Remote Sensing of Environment**, v. 56, n. 3, p. 194-202, jun. 1996.
- JACQUEMOUD, S.; VERHOEF, W.; BARET, F.; BACOUR, C.; ZARCO-TEJADA, P. J.; ASNER, G. P.; FRANÇOIS, C.; USTIN, S. L. PROSPECT+SAIL models: A review of use for vegetation characterization. **Remote Sensing of Environment**, v. 113, n. supplement 1, p. S56-S66, set. 2009.
- JACQUEMOUD, S.; VERHOEF, W.; BARET, F.; ZARCO-TEJADA, P. J.; ASNER, G. P.; FRANÇOIS, C.; USTIN, S. L. PROSPECT+SAIL: 15 Years of use for land surface characterization. In: IEEE International Symposium on Geoscience and Remote Sensing, IGARSS 2006, 2006, Denver, CO. **Proceedings...** Denver, CO: IEEE, 2006. p.1992-1995. ISBN. (0-7803-9510-7).
- JAGO, R. A.; CUTLER, M. E. J.; CURRAN, P. J. Estimating canopy chlorophyll concentration from field and airborne spectra. **Remote Sensing of Environment**, v. 68, n. 3, p. 217-224, 1999.
- JET PROPULSION LABORATORY (JPL). **Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer - Global Digital Elevation Model (ASTER-GDEM)**. Version 1. Greenbelt, MD: NASA, 2009. Warehouse Inventory Search Tool (WIST). Disponível em: < <https://wist.echo.nasa.gov> >. Acesso em: 27 maio 2009.
- JIANG, B.; LIANG, S.; WANG, J.; XIAO, Z. Modeling MODIS LAI time series using three statistical methods. **Remote Sensing of Environment**, v. 114, n. 7, p. 1432-1444, jun. 2010.
- JIANG, Z.; HUETE, A.; DIDAN, K.; MIURA, T. Development of a two-band enhanced vegetation index without a blue band. **Remote Sensing of Environment**, v. 112, n. 10, p. 3833-3845, 2008.
- JU, J.; ROY, D. P.; SHUAI, Y.; SCHAAF, C. Development of an approach for generation of temporally complete daily nadir MODIS reflectance time series. **Remote Sensing of Environment**, v.114, n.1, p.1-20, 2010.
- JUPP, D. L. B.; STRAHLER, A. H. A hotspot model for leaf canopies. **Remote Sensing of Environment**, v. 38, n. 3, p. 193-210, 1991.
- KARLSEN, S. R.; TOLVANEN, A.; KUBIN, E.; POIKOLAINEN, J.; HOGDA, K. A.; JOHANSEN, B.; DANKS, F. S.; ASPHOLM, P.; WIELGOLASKI, F. E.; MAKAROVA, O. MODIS NDVI-based mapping of the length of the growing season in northern Fennoscandia. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 10, n. 3, p. 253-266, 2008.
- KAUFMAN, J. Y. The atmospheric effect on remote sensing and its correction. In : ASRAR, G. **Theory and applications of optical remote sensing**. New York: Willey,

1989. cap. 8, p. 336-428. ISBN. (0471628956).

KAUFMAN, Y. J.; TANRÉ, D. Atmospherically resistant vegetation index (ARVI) for EOS-MODIS. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 30, n. 2, p. 261-270, 1992.

KIMES, D. S.; HARRISON, P. A.; HARRISON, P. R. Extension of off-nadir view angles for directional sensor systems. **Remote Sensing of Environment**, v. 50, n. 3, p. 201-211, 1994.

KIMES, D. S.; HOLBEN, B. N.; TUCKER, C. J.; NEWCOMB, W. W. Optimal directional view angles for remote-sensing missions. **International Journal of Remote Sensing**, v. 5, n. 6, p. 887-908, 1984.

KNYAZIKHIN, Y. V.; MARTONCHIK, J. V.; DINER, D. J.; MYNENI, R. B.; VERSTRAETE, M. M.; PINTY, B.; GOBRON, N. Estimation of vegetation canopy leaf area index and fraction of absorbed photosynthetically active radiation from atmosphere-corrected MISR data. **Journal of Geophysical Research**, v. 103, n. 32, p. 239-256, 1998a.

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. Greenbelt, MD: NASA Goddard Space Flight Center, 1999. 126 p.

KNYAZIKHIN, Y.; MARTONCHIK, J. V.; MYNENI, R. B.; DINER, D. J.; RUNNING, S. W. Synergistic algorithm for estimating vegetation canopy leaf area index and fraction of absorbed photosynthetically active radiation from MODIS and MISR data. **Journal of Geophysical Research**, v. 103, n. D24, p. 32257-32276, 1998.

KOLLENKARK, J. C.; VANDERBILT, V. C.; DAUGHTRY, C. S. T.; BAUER, M. E. Influence of solar illumination angle on soybean canopy reflectance. **Applied Optics**, v. 21, n. 7, p. 1179-1184, 1982.

KOTCHENOVA, S. Y.; VERMOTE, E. F.; MATARRESE, R.; KLEMM, F. J. Validation of a vector version of the 6S radiative transfer code for atmospheric correction of satellite data. Part I: Path radiance. **Applied Optics**, v. 45, n. 26, p. 6762-6774, 2006.

KUMAR, L.; SCHMIDT, K.; DURY, S.; SKIDMORE, A. Imaging spectroscopy and vegetation science. In: VAN DER MEER, F.; DE YONG, S. M. **Imaging spectrometry**: Basic principles and prospective applications. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2001. Cap. 5, p.111-155.

KUMAR, R. **Radiation from plants** - reflection and emission: a review - research

project n° 5543, Lafayette, Indiana: School of Aeronautics, Astronautics and Engineering Sciences, Purdue Research Foundation, 1972. 87 p.

KURZ, F.; HELLOWICH, O. Estimation of vegetation parameters from multispectral images using SAIL+PROSPECT model. In: Tagungsband DGPF Wissenschaftlich-Technische Jahrestagung, 2000, Wien. **Proceedings...** Wien: Berlin Institute of Technology, 2000. p. 1-10.

LAND PROCESSES DISTRIBUTED ACTIVE ARCHIVE CENTER (LPDAAC). **MODIS Reprojection Tool User's Manual** - Release 4.0. Sioux Falls: Land Processes Distributed Active Archive Center - USGS Earth Resources Observation and Science (EROS) Center and Department of Mathematics and Computer Science - South Dakota School of Mines and Technology, 2008. Disponível em: < https://lpdaac.usgs.gov/lpdaac/tools/modis_reprojection_tool >. Acesso em: 27 nov. 2008.

LAND SURFACE REFLECTANCE SCIENCE COMPUTING FACILITY (LSRSCF) - **MODIS surface reflectance**. College Park, USA: LSRSCF/ University of Maryland, 2008. Disponível em: < <http://modis-sr.ltdri.org/> >. Acesso: 17 novembro 2008.

LEBLON, B.; GALLANT, L.; GRANBERG, H. Effects of shadowing types on ground-measured visible and near-infrared shadow reflectances. **Remote Sensing of Environment**, v. 58, n. 3, p. 322-328, 1996.

LENCIONI, D. E.; HEARN, D. R.; DIGENIS, C. J.; MENDENHALL, J. A.; BICKNELL, W. E. The EO-1 Advanced Land Imager: An Overview. **Lincoln Laboratory Journal**, v. 15, n. 2, p. 165-180, 2005.

LEROY, M.; ROUJEAN, J. L. Sun and view angle corrections on reflectances derived from NOAA/AVHRR data. **Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 32, n. 3, p. 684-697, 1994.

LEWICKI, S.; MORONEY, C.; CREAN, K.; GLUCK, S.; MILLER, K.; PARADISE, S. **Data Products Specifications**: JPL D-13963, Revision E. California, USA: Jet Propulsion Laboratory - California Institute of Technology, 2004. 352p.

LIESENBERG, V.; GALVAO, L.; PONZONI, F. Variations in reflectance with seasonality and viewing geometry: Implications for classification of Brazilian savanna physiognomies with MISR/Terra data. **Remote Sensing of Environment**, v. 107, n. 1-2, p. 276-286, 2007.

LIMA, D.; SANTOS, A. M. B.; GARCIA, A.; OLIVEIRA, A. B.; CORRÊA-FERREIRA, B. S.; SEIXAS, C. D. S.; OLIVEIRA, F. A.; ADEGAS, F. S.; SILVA, J. F. V.; SANTOS, J. C. F.; LANDGRAFL, L.; OLIVEIRA, L. J.; OLIVEIRA, M. A.; SOARES, R. M. Produção integrada de soja. **Circular Técnica**, n. 64, 8p. Londrina: Embrapa-Soja, 2008. ISSN 1516-7860.

LIMA, M. S.; MAY, P. H. A expansão da fronteira agrícola no sul do Amazonas e sua relação com o incremento do desmatamento nas áreas de cerrados e campos naturais.

Meio Ambiente - Desflorestamento e Queimadas. Disponível em:

< <http://www.amazonia.org.br/arquivos/190311.pdf> >. Acesso em: 2 nov. 2009.

LOWRY, R. **Concepts and applications of inferential statistics**. Poughkeepsie, NY: Vassar College, 2009. Available at: < <http://faculty.vassar.edu/lowry/webtext.html> >. Access on October 16. 2009.

MAIRE, G. L.; MARSDEN, C.; VERHOEF, W.; PONZONI, F. J.; LO SEENB, D.; BÉGUÉB, À.; STAPEE, J. L.; NOUVELLON, Y. Leaf area index estimation with MODIS reflectance time series and model inversion during full rotations of Eucalyptus plantations. **Remote Sensing of Environment**, v. 115, n. 2, p. 586–599, fev. 2011.

MALLON, J.; WHELAN, P. F. Precise radial undistortion of images. In: International Conference on Pattern Recognition, 17, 2004, Cambridge. **Proceedings...** Cambridge: IEEE CS Press, 2004. p. 18-21. ISBN (0-7695-2128-2).

MARSHAK, A. The effect of the hot spot on the transport equation in plant canopies. **Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer**, v. 42, n. 6, p. 615-630, 1989.

MEER, F.D.; DE JONG, S.M. **Imaging spectrometry**: Basic principles and prospective application. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2001, 403p.

MERZLYAK, M. N.; GITELSON, A. A.; CHIVKUNOVA, O. B.; RAKITIN, V. Y. Non-destructive optical detection of pigment changes during leaf senescence and fruit ripening. **Physiologia Plantarum**, v. 106, n. 1, p. 135-141, 1999.

MEYER, D.; VERSTRAETE, M. M.; PINTY, P. The effect of surface anisotropy and viewing geometry on the estimation of NDVI from AVHRR. **Remote Sensing Reviews**, v. 12, n. 1, p. 3-27, 1995.

MIURA, T.; HUETE, A. R.; YOSHIOKA, H. Evaluation of sensor calibration uncertainties on vegetation indices for MODIS. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 38, n. 3, p. 1399-1409, maio 2000.

MO, X.; LIU, S.; LIN, Z.; XU, Y.; XIANG, Y.; MCVICAR, T. R. Prediction of crop yield, water consumption and water use efficiency with a SVAT-crop growth model using remotely sensed data on the North China Plain. **Ecological Modelling**, v. 183, n. 2-3, p. 301–322, abr. 2005.

MYNENI, R. B.; WILLIAMS, D. L. On the relationship between FAPAR and NDVI. **Remote Sensing of Environment**, v. 49, n. 3, p. 200-211, 1994.

MYNENI, R. B.; HOFFMAN, S.; KNYAZIKHIN, Y.; PRIVETTE, J. L.; GLASSY, J.; TIAN, Y.; WANG, Y.; SONG, X.; ZHANG, Y.; SMITH, G. R.; LOTSCH, A.; FRIEDL, M.; MORISETTE, J. T.; VOTAVA, P.; NEMANI, R. R.; RUNNING, S. W.

Global products of vegetation leaf area and fraction absorbed PAR from year one of MODIS data. **Remote Sensing of Environment**, v. 83, n. 1-2, p. 214-231, 2002.

MYNENI, R. B.; NEMANI, R. R.; RUNNING, S. W. Estimation of global leaf area index and absorbed PAR using radiative transfer models. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 35, n. 6, p. 1380-1393, 1997.

NASCIMENTO, R. D.; DEUNER, S.; FERREIRA, L. S.; BADINELLI, P. G.; KERBER, R. S. Crescimento e teores de clorofila e carotenóides em três cultivares de soja em função da adubação com magnésio. **Revista Ceres**, v. 56, n. 3, p. 364-369, 2009.

NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION (NASA). **Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS)** - Official web site. Washington – DC: NASA Headquarters, 2009. Disponível em: < <http://modis.gsfc.nasa.gov/> >. Acesso em: 28 nov. 2009.

NILSON, T.; KUUSK, A. A reflectance model for the homogeneous plant canopy and its inversion. **Remote Sensing of Environment**, v. 27, n. 2, p. 157-167, 1989.

OLIVEIRA, F. A.; CASTRO, C.; SFREDO, G. J.; KLEPKER, D.; OLIVEIRA JR., A. Fertilidade do solo e nutrição mineral da soja. **Circular Técnica**, n. 62, 8 p. Londrina: Embrapa-Soja, 2008. ISSN 1516-7860.

OLIVEIRA, F. A.; SFREDO, G. J.; CASTRO, C.; KLEPKER, D. Fertilidade do solo e nutrição da soja. **Circular Técnica**, n. 50, 8 p. Londrina: Embrapa-Soja, 2007. ISSN 1516-7860.

ONTARIO MINISTRY OF AGRICULTURE, FOOD AND RURAL AFFAIRS (OMAFRA). Soybean - Growth stages: agronomy guide for field crops **Agronomy Guide**, Pub 811. Guelph: OMAFRA, 2001.

ORIGINLAB CORPORATION. **OriginPro**: Data Analysis and Graphing Software. Version 8.0. One Roundhouse Plaza, Suite 303, Northampton, MA 01060 – USA, 2007.

PEARLMAN, J. S. **Hyperion validation report**. Kent, WA: The Boeing Company/NASA/GSF, 2003. 39 p. (Boeing Report, n. 03-ANCOS-001).

PEARLMAN, J. S.; BARRY, P. S.; SEGAL, C. C.; SHEPANSKI, J.; BEISO, D.; CARMAN, S. L. Hyperion, a space-based imaging spectrometer. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 41, n. 6, p. 1160-1173, 2003.

PENUELAS, J.; BARET, F.; FILELLA, I. Semiempirical indexes to assess carotenoids chlorophyll-a ratio from leaf spectral reflectance. **Photosynthetica**, v. 31, n. 2, p. 221-230, 1995.

PENUELAS, J.; PINOL, J.; OGAYA, R.; FILELLA, I. Estimation of plant water

concentration by the reflectance water index WI (R900/R970). **International Journal of Remote Sensing**, v. 18, n. 13, p. 2869-2875, 1997.

PINTER JR, P. J.; JACKSON, R. D.; MORAN, S. M. Bidirectional reflectance factors of agricultural targets: A comparison of ground-, aircraft-, and satellite-based observations. **Remote Sensing of Environment**, v. 32, n. 2-3, p. 215-228, 1990.

PÍPOLO, A. E.; ARIAS, C. A. A.; CARNEIRO, G. E. S.; TOLEDO, J. F. F.; OLIVEIRA, M. F.; PANIZZI, M. C. C.; KASTER, M.; ALDELNOOR, R. L.; MOREIRA, J. U. V. Desenvolvimento de geomoplasma e cultivares de soja. **Circular Técnica**, n. 52, 10 p. Londrina: EMBRAPA-Soja, 2007. ISSN 1516-7860.

PONZONI, F. J.; SHIMABUKURO, Y. E. **Sensoriamento remoto aplicado ao estudo da vegetação**. São José dos Campos: Parêntese, 2007. 135 p.

PRIVETTE, J. L.; EMERY, W. J.; SCHIMEL, D. S. Inversion of a vegetation reflectance model with NOAA AVHRR data. **Remote Sensing of Environment**, v. 58, n. 2, p. 187-200, 1996.

PRIVETTE, J. L.; MYNENI, R. B.; KNYAZIKHIN, Y.; MUKELABAI, M.; ROBERTS, G.; TIAN, Y.; WANG, Y.; LEBLANC, S. G. Early spatial and temporal validation of MODIS LAI product in the Southern Africa Kalahari. **Remote Sensing of Environment**, v. 83, p. 232-243, 2002.

QI, J.; CABOT, F.; MORAN, M. S.; DEDIEU, G. Biophysical parameter estimations using multidirectional spectral measurements. **Remote Sensing of Environment**, v. 54, n. 1, p. 71-83, 1995.

RAFFY, M. Change of scale in models of remote sensing: A general method for spatialization of models. **Remote Sensing of Environment**, v. 40, n. 2, p. 101-112, 1992.

RANSON, K. J.; BIEHL, L. L.; BAUER, M. E. Variation in spectral response of soybean with respect to illumination, view and canopy geometry. **International Journal of Remote Sensing**, v. 6, n. 12, p. 1827-1842, 1985.

REDDY, G. S.; RAO, C. L. N.; VENKATARATNAM, L.; RAO, P. V. K. Influence of plant pigments on spectral reflectance of maize, groundnut and soybean grown in semi-arid environments. **International Journal of Remote Sensing**, v. 22, n. 17, p. 3373-3380, 2001.

REN, J. Q.; CHEN, Z. X.; ZHOU, Q. B.; TANG, H. J. Regional yield estimation for winter wheat with MODIS-NDVI data in Shandong, China. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 10, n. 4, p. 403-413, dez. 2008.

RIZZI, R.; RUDORFF, B. F. T. Imagens do sensor MODIS associadas a um modelo agrônomo para estimar a produtividade de soja. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 42, n. 1, p. 73-80, 2007.

- RIZZI, R.; RUDORFF, B. F. T.; SHIMABUKURO, Y. E.; DORAISWAMY, P. C. Assessment of MODIS LAI retrievals over soybean crop in Southern Brazil. **International Journal of Remote Sensing**, v. 27, n. 19, p. 4091-4100, 2006.
- ROESSING, A. C.; LAZZAROTTO, J. J. **Criação de empregos pelo complexo agroindustrial da soja**. Londrina: EMBRAPA Soja, 2004. 50p. Série Documentos, n° 233. ISSN: 1516-781X.
- ROSA, L. M.; FORSETH, I. N. Diurnal patterns of soybean leaf inclination angles and azimuthal orientation under different levels of ultraviolet-B radiation. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 78, n. 1-2, p. 107-119, 1995.
- ROSS, J. **Radiation regime and architecture of plant stands**. Massachusetts: Dr W. Junk Publishers, 1981. 420p.
- ROUJEAN, J. A parametric hot spot model for optical remote sensing applications. **Remote Sensing of Environment**, v. 71, n. 2, p. 197-206, 2000.
- ROUSE, J. W.; HAAS, R. H.; SCHELL, J. A.; DEERING, D. W. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. In: Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium, 3, 1973, Washington, DC. **Proceedings...** Washington, DC: NASA, 1973. p. 309-317.
- SANDMEIER, S. R.; ITTEN, K. I. A field goniometer system (FIGOS) for acquisition of hyperspectral BRDF data. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 37, n. 2, p. 978-986, 1999.
- SANDMEIER, S. T.; MÜLLER, C. H.; HOSGOOD, B.; ANDREOLI, G. Sensitivity analysis and quality assessment of laboratory BRDF data. **Remote Sensing of Environment**, v. 64, n. 2, p. 176-191, 1998.
- SCHAEPMAN-STRUB, G.; SCHAEPMAN, M. E.; PAINTER, T. H.; DANGEL, S.; MARTONCHIK, J. V. Reflectance quantities in optical remote sensing – definitions and case studies. **Remote Sensing of Environment**, v. 103, n. 1, p. 27-42, 2006.
- SCHOLFIELD, C. R.; DUTTON, H. J. Sources of color in soybean “lecithin.” **Journal of the American Oil Chemists Society**, v. 31, n. 6, p. 258-261, 1954.
- SELLERS, P. J. Canopy reflectance, photosynthesis, and transpiration, II. The role of biophysics in the linearity of their interdependence. **Remote Sensing of Environment**, v. 21, n. 2, p. 143-183, 1987.
- SFREDO, G. J. Calagem e adubação da soja. **Circular Técnica**, n. 61, 12 p. Londrina: Embrapa-Soja, 2008. ISSN 1516-7860.
- SHABANOV, N. V.; HUANG, D.; YANG, W.; TAN, B.; KNYAZIKHIN, Y.; MYNENI, R. B.; AHL, D. E.; GOWER, S. T.; HUETE, A. R.; ARAGAO, L. E. O. C.; SHIMABUKURO, Y. E. Analysis and optimization of the MODIS leaf area index

algorithm retrievals over broadleaf forests. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 43, n. 8, p. 1855-1865, Aug. 2005.

SHIBAYAMA, M.; WIEGAND, C. L. View azimuth and zenith, and solar angle effects on wheat canopy reflectance. **Remote Sensing of Environment**, v. 18, n. 1, p. 91-103, 1985.

SHIKADA, M.; MIYAKITA, K. Effect of solar and view angles on reflectance for paddy field canopies. **Geocarto International**, v. 7, n. 3, p. 9-17, 1992.

SIGMAPLOT. **Systat Software 12** – for windows. A subsidiary of Cranes Software Int. Ltd. Chicago, IL: SigmaPlot, 2009.

SLATER, P. N. **Remote sensing: optics and optical systems**. Reading, MA: Addison-Wesley, 1980. 575p.

SMITH, K. L.; STEVE, M. D; COLLS, J. J. Use of hyperspectral derivative ratios in the red-edge region to identify plant stress responses to gas leaks. **Remote Sensing of Environment**, v. 92, n. 2, p. 207-217, 2004.

SOUZA, A. A.; GALVÃO, L. S.; SANTOS, J. R. Relationships between Hyperion-derived vegetation indices, biophysical parameters, and elevation data in a Brazilian savannah environment. **Remote Sensing Letters**, v. 1, n. 1, p. 55-64, 2010.

STRAHLER, A. H.; LUCHT, W.; SCHAAF, C. B.; TSANG, T.; GAO, F.; LI, X.; MULLER, J. P.; LEWIS, P.; BARNSELY, M. J. **MODIS BRDF/Albedo product: MODIS Bidirectional Reflectance Distribution Function (MOD09) and Albedo Product (MOD43B) - Algorithm Theoretical Basis Document**. Version 5.0. Boston, MA: GSFC/NASA, 1999a. Disponível em:
< http://modis.gsfc.nasa.gov/data/atbd/atbd_mod09.pdf >. Acesso em: 1 nov. 2009.

STRAHLER, A. H.; WOODCOCK, C. E.; SMITH, J. A. On the nature of models in remote sensing. **Remote Sensing of Environment**, v. 20, n. 2, p. 121-139, 1986.

STRAHLER, A.; MUCHONEY, D.; BORAK, J.; FRIEDL, M.; GOPAL, S.; LAMBIN, E.; MOODY, A. **MODIS land cover product: algorithm theoretical basis document (ATBD) - MODIS land cover and land-cover change**. Version 5.0. Boston, MA: GSFC/NASA, 1999. Disponível em:
< http://modis.gsfc.nasa.gov/data/atbd/atbd_mod12.pdf >. Acesso em: 17 maio 2008.

TAN, B.; HU, J.; HUANG, D.; YANG, W.; ZHANG, P.; SHABANOV, N. V.; KNYAZIKHIN, Y.; NEMANI, R. R.; MYNENI, R. B. Assessment of the broadleaf crops leaf area index product from the Terra MODIS instrument. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 135, p. 124-134, 2005.

THE MATHWORKS INC. **MATLAB®**: The language of Technical Computing. Version 7.4.0. Natick, Massachusetts: The MathWorks Inc., 2007.

VALBUENA, R. Les dynamiques territoriales associées au soja et les changements fonctionnels en Amazonie. Le cas de la région de Santarém, Pará, Brésil. **Confins - Revue Franco-Brésilienne de Géographie**, n. 5, p. 1-20, 2009.

VERHOEF, W. Earth observation modeling based on layer scattering matrices. **Remote Sensing of Environment**, v. 17, n. 2, p. 165-178, 1985.

VERHOEF, W. Light scattering by leaf layers with application to canopy reflectance modeling: The SAIL model. **Remote Sensing of Environment**, v. 16, n. 2, p. 125-141, 1984.

VERHOEF, W.; BACH, H. Coupled soil-leaf-canopy and atmosphere radiative transfer modeling to simulate hyperspectral multi-angular surface reflectance and TOA radiance data. **Remote Sensing of Environment**, v. 109, n. 2, p. 166-182, 2007.

VERHOEF, W.; BACH, H. Simulation of hyperspectral and directional radiance images using coupled biophysical and atmospheric radiative transfer models. **Remote Sensing of Environment**, v. 87, n. 1, p. 23-41, 2003.

VERHOEF, W.; LI, J.; QING, X.; SU, Z. Unified optical-thermal four-stream radiative transfer theory for homogeneous vegetation canopies. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 45, n. 6, p. 1808-1822, 2007.

VERMOTE, E. F.; TANRÉ, D.; DEUZE, J. L.; HERMAN, M.; MORCRETTE, J. J. Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum: an overview. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 35, n. 3, p. 675-686, 1997.

VERMOTE, E. F.; VERMEULEN, A. **MODIS Algorithm Technical Background Document Atmospheric correction algorithm: spectral reflectances (MOD09)**. Version 4.0, April 1999. NASA contract NAS5-96062. Maryland: GSFC/NASA, 1999. Disponível em: < http://modis.gsfc.nasa.gov/data/atbd/atbd_mod08.pdf >. Acesso em: 1 nov. 2009.

VERRELST, J.; SCHAEPMAN, M.; KOETZ, B.; KNEUBUHLER, M. Angular sensitivity analysis of vegetation indices derived from CHRIS/PROBA data. **Remote Sensing of Environment**, v. 112, n. 5, p. 2341-2353, 2008.

VOGELMANN, J. E.; ROCK, B. N.; MOSS, D. M. Red edge spectral measurements from sugar maple leaves. **International Journal of Remote Sensing**, v. 14, n. 8, p. 1563-1575, 1993.

WALTER-SHEA, E. A.; NORMAN, J. M. Leaf bidirectional reflectance and transmittance in corn and soybean. **Remote Sensing of Environment**, v. 29, n. 2, p. 161-174, 1989.

WALTER-SHEA, E. A.; PRIVETTE, J.; CORNELL, D.; MESARCH, M. A.; HAYS, C. J. Relations between directional spectral vegetation indices and leaf area and absorbed radiation in alfalfa. **Remote Sensing of Environment**, v. 61, n. 1, p. 162-177,

1997.

WANG, L.; HUNT, J.; QU, J. J.; HAO, X.; DAUGHTRY, C. S. T. Towards estimation of canopy foliar biomass with spectral reflectance measurements. **Remote Sensing of Environment**, v. 115, n. 3, p. 836–840, 2011.

WARDLEY, N. W. Vegetation index variability as a function of viewing geometry. **International Journal of Remote Sensing**, v. 5, n. 5, p. 861-870, 1984.

WILCOXON, F. Individual comparisons by ranking methods. **Biometrics Bulletin**, v. 1, n. 6, p. 80-83, 1945.

WITTEN, I. H.; FRANK, E. **Data mining**: practical machine learning tools and techniques. Massachusetts: Morgan Kaufmann, 2005. 525p.

WOODCOCK, C. E.; STRAHLER, A. H. The factor of scale in remote sensing. **Remote Sensing of Environment**, v. 21, n. 3, p. 311-332, 1987.

XIAOWEN, L.; STRAHLER, A. H.; WOODCOCK, C. E. A hybrid geometric optical-radiative transfer approach for modeling albedo and directional reflectance of discontinuous canopies. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 33, n. 2, p. 466-480, 1995.

XIONG, J.; TOLLER, G.; CHIANG, V.; SUN, J.; ESPOSITO, J.; BARNES, W. **MODIS Level 1B Algorithm Theoretical Basis Document**: MODIS Characterization Support Team, Version 3. Pasadena: GSFC/NASA, 2005. Disponível em: < <http://mcst.gsfc.nasa.gov/uploads/files/documents/M1058.pdf> >. Acesso em: 11 jun. 2008.

XIONG, X.; BARNES, W. MODIS calibration and characterization. In: QU, J.; GAO, W.; KAFATOS, M.; MURPHY, R.; SALOMONSON, V. **Earth science satellite remote sensing**. vol. 2. Berlin: Springer-Verlag, 2005. cap. 4, p. 77-97.

YANG, W.; HUANG, D.; TAN, B.; STROEVE, J. C.; SHABANOV, N. V.; KNYAZIKHIN, Y.; NEMANI, R. R.; MYNENI, R. B. Analysis of leaf area index and fraction of PAR absorbed by vegetation products from the Terra MODIS sensor: 2000-2005. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 44, n. 7, p. 1829-1842, 2006.

YI, Y.; YANG, D.; HUANG, J.; CHEN, D. Evaluation of MODIS surface reflectance products for wheat leaf area index (LAI) retrieval. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 63, n. 6, p. 661-677, 2008.

YU, X.; YAN, Q.; LIU, Z. Atmospheric correction of HJ-1A multi-spectral and hyperspectral images. In: International Congress on Image and Signal Processing, 3, 2010, Yantai, China. **Proceedings...** Yantai, China: IEEE, 2010. p. 2125-2129. (DOI: 10.1109/CISP.2010.5647381)

Classification of soybean varieties using different techniques: a case study with Hyperion and simulation of multispectral sensors

Fábio M. Breunig, Lênio S. Galvão, Antônio R. Formaggio, José C. N. Epiphânio

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), Divisão de Sensoriamento Remoto, Caixa Postal 515, 12245-970, São José dos Campos, SP, Brazil.

breunig@dsr.inpe.br , lenio@dsr.inpe.br , formaggio@dsr.inpe.br , epiphanio@dsr.inpe.br

Abstract. The planned generation of imaging spectrometers with higher signal-to-noise ratio and broader swath brings new perspectives for crop classification over large areas. Here, we used Hyperion/Earth Observing-One (EO-1) data collected over Brazilian soybean fields to evaluate the performance of four classification techniques (Maximum Likelihood - ML; Spectral Angle Mapper - SAM; Spectral Information Divergence - SID; Support Vector Machine - SVM) to discriminate five soybean varieties. The influence of spectral resolution on classifying them was analyzed by simulating the spectral response of seven multispectral sensors using Hyperion data. Before classification, the Waikato Environment for Knowledge Analysis (WEKA) was used for feature selection. Results showed the importance of the green, red edge, near infrared and shortwave infrared to discriminate the soybean varieties. Monsoy 8411 was sensed by Hyperion in a later reproductive stage and was the most easily discriminated variety. The best classification techniques were ML and SVM with overall accuracy of 89.80% and 81.76%, respectively. The accuracy of spectral matching techniques was lower (70.84% for SAM and 72.20% for SID). When ML was applied to the simulated multispectral sensors, MODIS and ETM+ presented the highest accuracy whereas AVHRR showed the lowest one.

Keywords: hyperspectral, soybean, classification, Hyperion, sensor simulation, agriculture.

1 INTRODUCTION

Imaging Spectrometry, also known as hyperspectral remote sensing, can be potentially used for the monitoring, classification and grain yield estimation of perennial [1,2], semi-perennial [3,4] and annual crops [5-8]. It can be also used for cultivar discrimination, which is important for inventory, crop certification and for improving the performance of crop yield models [9-11]. For crop type discrimination, the possibilities in near future of having orbital imaging spectrometers with better signal-to-noise ratio (SNR) and larger swath width than the available hyperspectral sensors introduce new perspectives to improve classification accuracy. For example, when compared to the available Hyperion/Earth Observing-One (EO-1) which acquires data on demand over narrow swath width (7.7 km) and with low SNR (40 in the shortwave infrared - SWIR), the NASA's planned Hyperspectral Infrared Imager (HyspIRI) will acquire images in more than 200 bands with swath width of 150 km and SNR of 400 in the SWIR [12]. Therefore, some limitations of multispectral data for crop type discrimination may be overcome with a hyperspectral Landsat/TM alike sensor [13-16].

Despite the low SNR and narrow swath width, Hyperion acquired data over Brazilian agricultural fields providing an opportunity to test different classification techniques and to simulate the spectral resolution of distinct multispectral sensors. Classification results can be then compared between the Hyperion and simulated multispectral sensors for cultivar discrimination. Maximum likelihood (ML), spectral angle mapper (SAM), spectral

information divergence (SID) and support vector machine (SVM) are four examples of very distinct classification techniques usually used in hyperspectral analyses. ML assumes that the statistics for each class in each band are normally distributed and calculates the probability that a given pixel belongs to a specific class [17]. SAM calculates the angular similarity between a reference spectra and each pixel spectrum comparing the shape between the reflectance curves [18,19]. SID differs from SAM by using a measure of divergence to match pixel to reference spectra [20-22]. Finally, SVM is especially useful for classification of high dimensional and noisy data discriminating classes with a decision surface that maximizes the margin between them [23,24]. In general, classification of hyperspectral data using ML requires feature selection to avoid the Hughes phenomenon, that is, the loss of accuracy when data dimensionality increases while the training sample size remains fixed [25,26]. However, even for SVM, feature selection is recommended, as demonstrated recently by Ref. 27.

Soybean is an important agricultural commodity, which has presented an expressive expansion in the last decades in Brazil [28,29]. On 8 February 2005, Hyperion acquired data over a soybean farm located in the Brazilian state of Mato Grosso. Five soybean varieties were sensed by Hyperion at different reproductive stages. Thus, in this work we test the hypothesis that different classification techniques applied to hyperspectral data can improve cultivar discrimination when compared to simulated multispectral data.

Thus, the objectives of this work were: (a) to evaluate the performance of different classification techniques for the discrimination of soybean varieties, when using Hyperion data; and (b) to analyze the spectral resolution influence on discriminating them by simulating the spectral response of selected multispectral sensors from Hyperion.

2 METHODOLOGY

2.1 Study area and soybean agronomic data

The study area is the Tanguro farm located in Querência municipality, Mato Grosso state, central Brazil (Fig. 1). This area is characterized by a flat topography (350 m of altitude) with soil predominance of Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico (Typic Acrustox, in the USA Soil Taxonomy) [30]. The climate type is designed as tropical, with mean temperature of 26 °C and annual rainfall of 1850 mm, with a well-defined dry season from May to September and a rainy season from October to April. The native vegetation comprises the transition between savannas (Cerrado) and Amazonian tropical rainforest.

Soybean varieties are continuously developed to improve the yield, the resistance to natural diseases and environmental stresses (soil adaptation; heavy rain or water stress), and the adaptation to the local photoperiod [31]. As shown in the reference map (Figure 1b), five soybean varieties were planted at the Tanguro farm in the 2004-2005 growing season, covering approximately 8500 ha: Perdiz, Monsoy 8411, Monsoy 9010, Kaiabi and Tabarana. Perdiz was predominant in the study area and Monsoy 8411 presented the shortest life cycle (116 days). In general, the varieties were planted in different dates along October to November and harvested in the period of March to April (Table 1). Better grain yields were obtained for Monsoy 9010 and Monsoy 8411. The average yield of all varieties was 2942 kg/ha. All soybean varieties showed complete canopy closure but different reproductive stages, that ranged from R5 (beginning seed) to R6 (full seed) and R7 (beginning maturity), at the acquisition time of the used Hyperion image (February 8, 2005). The row spacing was constant (45 cm).

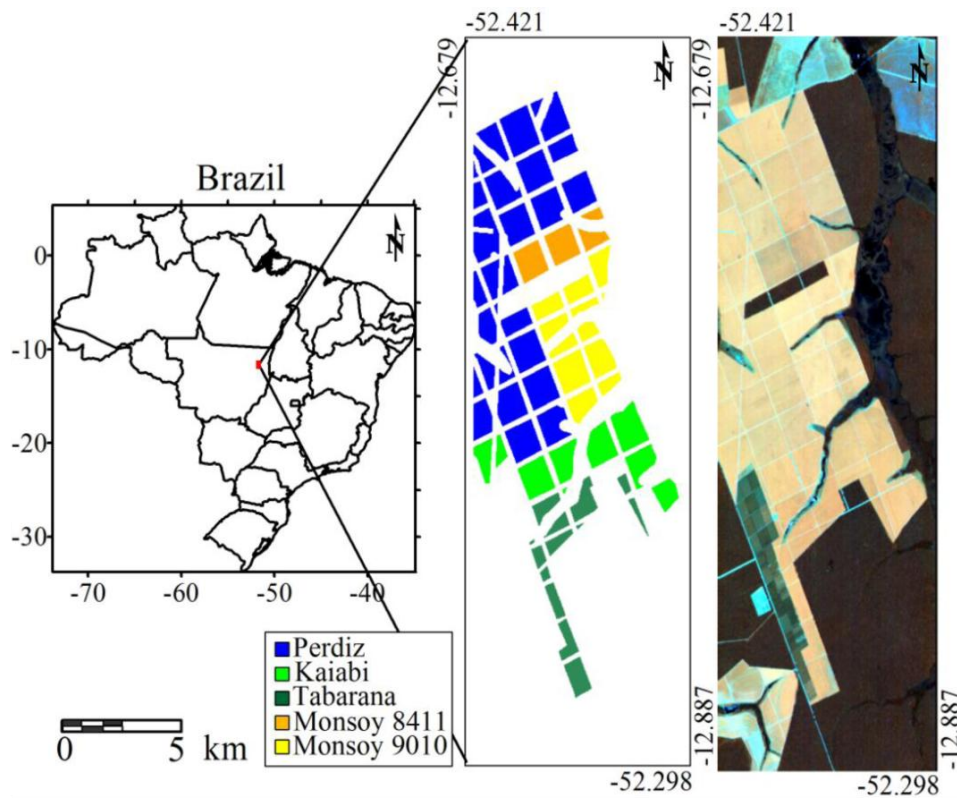


Fig. 1. Location of the Tanguro farm in central Brazil. The reference map of the soybean varieties planted in the 2004-2005 growing season is indicated and other land cover types are masked in white. The false color composite includes the Hyperion bands positioned at 884 nm (red), 1659 nm (green) and 2203 nm (blue).

Table 1. Agronomic data for the five soybean varieties planted at the Tanguro farm in the 2004-2005 growing season.

Varieties	Plating date MM/DD,YY	Harvest date MM/DD,YY	Local cycle (Days)	DAP* (Days)	Yield (kg/ha)	R**
Perdiz	Oct. 30 to Nov. 8, 2004	March 7 to April 9, 2005	138	96	2926.70	5
Monsoy 8411	Oct. 29 to Nov. 1, 2004	Feb. 20-28, 2005	116	100	3190.23	6-7
Monsoy 9010	Nov. 12-17, 2004	March 24 to April 1, 2005	131	85	3160.81	5
Kaiabi	Nov. 8-11, 2004	March 31 to April 10, 2005	147	91	2706.06	5
Tabarana	Nov. 10-13, 2004	March 31 to April 10, 2005	145	89	2919.26	5

*Days after planting (DAP), considering the mean planting date and the Hyperion image acquisition on February 8, 2005.

**Reproductive stage ranging from R5 (beginning seed) to R6 (full seed) and R7 (beginning maturity), defined according to Ref. 32.

2.2 Pre-processing of Hyperion data

Hyperion acquires images in 196 radiometrically calibrated narrow and continuous bands (10 nm of width) in the 400-2400 nm spectral interval. The swath width is 7.7 km and the spatial resolution is 30 m. The 16-days temporal resolution can be reduced by side looking or sensor pointing [33,34]. However, the resultant off-nadir viewing usually enhances directional effects due to crop anisotropy in spectral response to changes in view-illumination geometry [7,35,36].

In this study, Hyperion acquired the image on February 8, 2005, with 21° view angle in the forward scattering direction, in which shade effects predominated for the sensor. Image pre-processing involved the application of an algorithm for striping removal [37] and the Fast Line-of-Sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes (FLAASH) to convert radiance data into atmospherically corrected surface reflectance using [38,39]. A tropical-rural atmospheric model was adopted with water absorption estimates from the 1130 nm spectral feature. We used the 2-band (K-T) method [40] to estimate the amount of aerosols and the scene average visibility (63 km). To smooth data for artifacts resultant from the atmospheric correction and poor SNR of Hyperion, an inverse minimum noise fraction (MNF) transformation was applied over different spectral intervals [41].

After pre-processing the data, the following 150 Hyperion bands were used in data analysis: bands 6 to 50 (477-915 nm), 51 to 91 (932-1336 nm), 105 to 136 (1477-1790 nm), and 160 to 192 (2032-2355 nm). Noisy Hyperion bands were excluded as well as those positioned around 1400 and 1900 nm, which are wavelengths of strong water vapor absorption. The final step was the geometric correction using a polynomial function and the nearest neighbor resampling method.

2.3 Data Analysis

We tested discrimination of the five studied soybean varieties using four different classification techniques (ML, SAM, SID and SVM) applied to Hyperion data. Before classifying the Hyperion data, we used the Waikato Environment for Knowledge Analysis (WEKA) data mining algorithm for feature selection [42,43]. Feature selection, which consisted on selecting the best subset of Hyperion bands from the set of 150 pre-processed bands, was based on the greedy hill climbing stepwise search method with rank generation [26]. The method was applied to the training set of 1500 pixels (300 pixels per soybean variety). The Correlation-Based Feature Selection Subset Evaluator [44], which considers the individual predictive ability of each band and the redundancy between the bands, was adopted in data analysis [26,44,45]. The ranked bands from feature selection were also used to evaluate the Hughes effect on each classification technique.

To allow comparison of classification accuracy between these techniques from a common baseline, we fixed the number of training (300 randomly selected pixels per variety) and validation (reference map) pixels. The same procedure was adopted for the number of input bands for classification, which was defined from feature selection. The classification was performed exclusively over the soybean farm and other land cover types were masked. Using the soybean reference map (Fig. 1), confusion matrices were generated to obtain the producer's and user's accuracies, the overall classification accuracy and the Kappa values. Discussion on the discrimination of the soybean varieties considered also the differences in reproductive stages between the varieties.

To analyze the spectral resolution influence for discriminating the studied five soybean varieties, we simulated the spectral response of seven multispectral sensors, using their filter functions (Table 2). The simulated sensors were: (1) Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER)/Terra; (2) Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR)/NOAA-17; (3) IKONOS; (4) Enhanced Thematic Mapper plus

(ETM+)/Landsat-7; (5) Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS)/Terra; (6) RapidEye; and (7) High Resolution Geometric (HRG)/SPOT-5. ASTER band 9 (2360-2430 nm) and MODIS bands 8 (405-420 nm) and 20 to 36 (3660 to 14385 nm) were not simulated because they were out of the spectral range of Hyperion operability. The sensors listed in Table 2 were selected to represent distinct band positioning and bandwidths. In Table 2, AVHRR, RapidEye and Ikonos represent data acquisition only in the visible and near infrared, whereas the remaining sensors represent an extended operability into the SWIR.

The classification technique of best performance with Hyperion was applied to images of the seven multispectral simulated sensors and results were compared between the sensors. The same training and validation pixels were used in the calculations, and confusion matrices were generated for each sensor classification.

Table 2. Band positioning of the simulated multispectral sensors from Hyperion data using the filter functions.

Sensor	Blue Band (nm)	Green Band (nm)	Red Band (nm)	Red Edge Band (nm)	NIR-1 Band (nm)	NIR-2 Band (nm)	SWIR-1 Band (nm)	SWIR-2 Band (nm)
AVHRR/NOAA-17	-	-	580-680	-	725-1000	-	1580-1640	-
ETM+/Landsat-7	450-515	525-605	630-690	-	775-900	-	1550-1750	2090-2350
MODIS/Terra	438-448	526-536	620-670	743-753	841-876	1230-1250	1628-1652	2105-2155
	459-479	545-565	662-672		862-877	931-941		
	483-493	546-556	673-683		890-920	915-965		
ASTER/Terra	-	520-600	630-690	-	760-860	-	1600-1700	2145-2185
								2185-2225
								2235-2285
								2295-2365
HRG/SPOT-5	-	500-590	610-680	-	780-890	-	1580-1750	-
IKONOS	445-516	506-595	632-698	-	757-853	-	-	-
RapidEye	440-510	520-590	630-685	690-730	760-850	-	-	-

3 RESULTS AND DISCUSSION

3.1 Feature selection

From the use of the WEKA data mining algorithm, we selected 20 Hyperion bands centered at the following wavelengths as the best subset of bands to discriminate the five soybean varieties: 508; 538; 548; 559; 569; 589; 701; 711; 721; 732; 752; 874; 932; 1124; 1628; 1659; 1749; 2102; 2163; 2203 nm. Classification accuracy of the training pixels using ML, SAM, SID and SVM did not improve significantly with the inclusion of additional bands in the analysis (Fig. 2). However, the Hughes effect, decreasing the classification accuracy, was evident on the ML classification of the training pixels when more than 100 bands were included in data analysis. Even for SVM, classification accuracy decreased as more bands were added from 82% (20 bands) to 75% (150 bands). This result is in agreement with that found by Ref. 27, who demonstrated that SVM is still sensible to the Hughes phenomena, especially when a small number of training samples is used.

The first ranked bands by WEKA included the green (508, 538, 548, 559, 569, and 589 nm), red edge (701, 711, 721, 732 nm) and NIR (752, 874, 932, and 1124 nm) spectral intervals, closely followed by the SWIR-1 (1628, 1659, and 1749 nm). The last ranked bands were placed in the SWIR-2 (2102; 2163; 2203 nm). Relationships between the reflectance of the green (559 nm) and NIR (874 nm) Hyperion bands showed a clear discrimination of Monsoy 8411, which presented higher reflectance values in the green and lower in the NIR than the other soybean varieties (Fig. 3a). As discussed before, when compared to the other varieties,

Monsoy 8411, which has the shortest life cycle (116 days), was sensed by Hyperion in a more advanced reproductive stage (Table 1). Hyperion bands positioned in the red edge interval (690-750 nm) could also differentiate Monsoy 8411 whereas the SWIR-1 interval (1500-1750 nm) was especially useful to discriminate Monsoy 9010 from the other varieties (Fig. 3b).

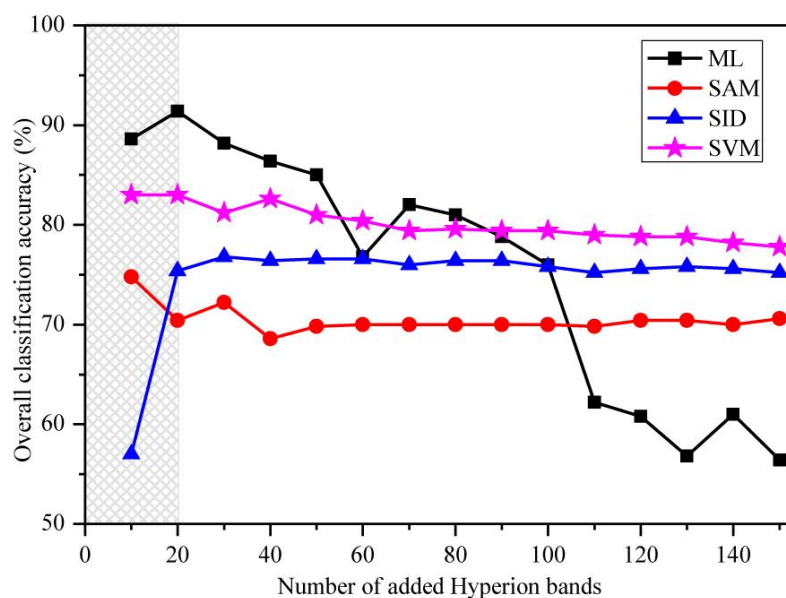


Fig. 2. Effects of the inclusion of the Hyperion ranked bands (feature selection) on the overall classification accuracy of the training pixels by the four classification techniques. The first 20 bands (dashed area) used for subsequent Hyperion image classification are discussed in the text.

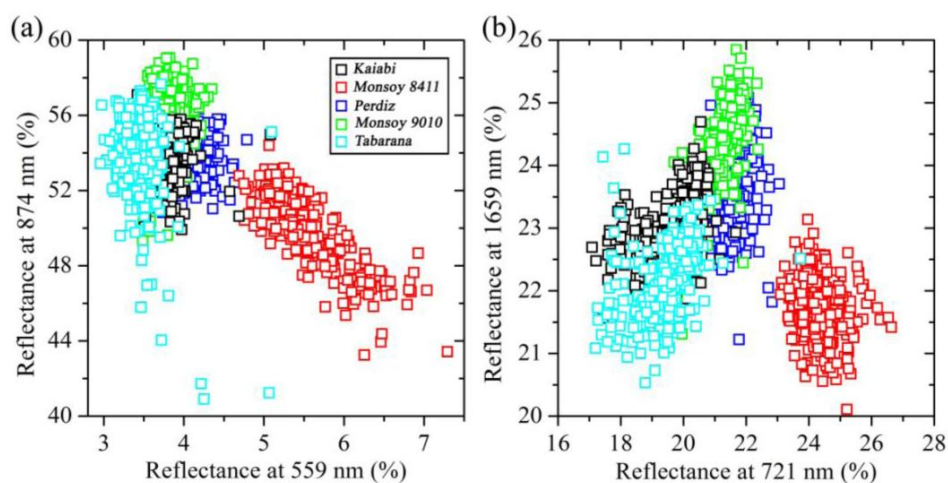


Fig. 3. Relationships between the reflectance of the Hyperion bands positioned at: (a) 559 nm and 874 nm; and (b) 721 nm and 1659 nm. A total of 300 pixels per variety were used.

3.2. Classification techniques applied to Hyperion data

When compared to the reference map, the best classification results with the selected 20 Hyperion bands were obtained using ML, whereas the worst results were obtained using SAM (Fig. 4). Overall classification accuracy and Kappa values ranged from 89.80% and 0.85 for ML to 70.84% and 0.59 for SAM, respectively (Table 3). Inspection of the confusion matrices showed that all of the studied techniques discriminated adequately the variety Monsoy 8411 which presented producer's accuracy values close or equal to 100%.

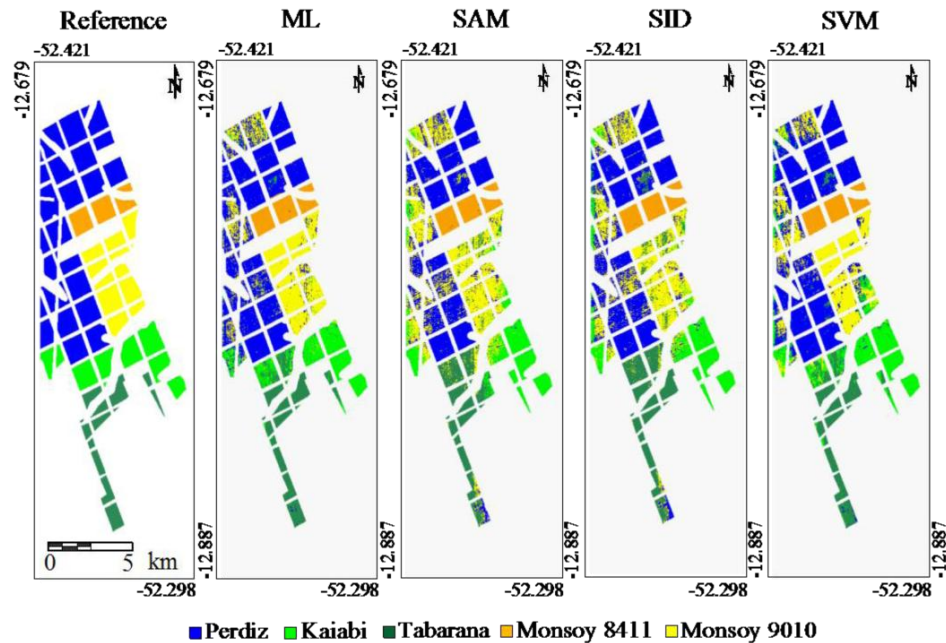


Figure 4 – Reference map of the soybean varieties and Hyperion image classification by the four used techniques. Maximum Likelihood (ML) and Spectral Angle Mapper (SAM) presented the highest and lowest overall classification accuracy, respectively.

The good discrimination of Monsoy 8411 was associated to its more advanced reproductive stage (R6-R7) at the time of Hyperion image acquisition. In relation to the other varieties, Monsoy 8411 presented larger reflectance in the visible and lower one in the NIR and SWIR (Fig. 5), as well as it showed also larger variability (standard deviation bars; results not shown). As demonstrated by Ref. 7, soybean development stages impact the classification results, because the varieties have different life cycles (growth rates) and they are planted at slight different periods from October to November in central Brazil.

Continuing in the analysis of Table 3, the most important difference in classification performance between the used techniques was associated with the better ability of ML and SVM to differentiate the Kaiabi variety. Producer's accuracy for Kaiabi ranged from 92.42 % (ML) and 76.65 % (SVM) to 55.02% (SID) and 47.81% (SAM). Kaiabi was generally misclassified as Perdiz or Tabarana by SAM and SID (Fig. 4; Table 3), which are techniques that compare each pixel spectrum with reference spectra of the varieties. Results were consistent with Fig. 5 that showed similarity in spectra shape between the Kaiabi and Perdiz-Tabarana varieties.

Table 3. Confusion matrices for the classification of soybean varieties using four different classification techniques applied to Hyperion data and using a fixed number of 20 bands chosen by the feature selection algorithm.

ML							
Soybean variety	Perdiz (%)	Monsoy 8411 (%)	Monsoy 9010 (%)	Kaiabi (%)	Tabarana (%)	Total (pixels)	Producer's Accuracy (%)
Perdiz (%)	87.36	0.00	6.73	2.15	0.51	23605	87.36
Monsoy 8411 (%)	0.33	100.00	0.03	0.04	0.04	3242	100.00
Monsoy 9010 (%)	8.68	0.00	89.20	1.09	0.02	7418	89.20
Kaiabi (%)	3.38	0.00	3.85	92.42	7.89	7769	92.42
Tabarana (%)	0.24	0.00	0.19	4.30	91.54	4841	91.54
User's accuracy (%)	96.76	97.42	75.60	83.00	91.72		
Overall accuracy (%)	89.80						
Kappa coefficient	0.85						
SAM							
Soybean variety	Perdiz (%)	Monsoy 8411 (%)	Monsoy 9010 (%)	Kaiabi (%)	Tabarana (%)	Total (pixels)	Producer's Accuracy (%)
Perdiz (%)	74.34	0.03	11.39	2.82	6.69	23605	74.34
Monsoy 8411 (%)	0.34	99.97	0.00	0.00	0.02	3242	99.97
Monsoy 9010 (%)	18.80	0.00	62.69	16.80	0.23	7418	62.69
Kaiabi (%)	1.65	0.00	2.32	47.81	9.32	7769	47.81
Tabarana (%)	4.87	0.00	23.59	32.57	83.74	4841	83.74
User's accuracy (%)	92.67	97.56	44.69	78.59	42.74		
Overall accuracy (%)	70.84						
Kappa coefficient	0.59						
SID							
Soybean variety	Perdiz (%)	Monsoy 8411 (%)	Monsoy 9010 (%)	Kaiabi (%)	Tabarana (%)	Total (pixels)	Producer's Accuracy (%)
Perdiz (%)	69.73	0.06	4.11	2.19	6.61	23605	69.73
Monsoy 8411 (%)	0.17	99.94	0.01	0.03	0.06	3242	99.94
Monsoy 9010 (%)	24.89	0.00	81.28	12.59	5.40	7418	81.28
Kaiabi (%)	3.64	0.00	3.67	55.02	8.73	7769	55.02
Tabarana (%)	1.58	0.00	10.93	30.18	79.20	4841	79.20
User's accuracy (%)	95.36	98.60	45.86	73.28	52.40		
Overall accuracy (%)	72.20						
Kappa coefficient	0.62						
SVM							
Soybean variety	Perdiz (%)	Monsoy 8411 (%)	Monsoy 9010 (%)	Kaiabi (%)	Tabarana (%)	Total (pixels)	Producer's Accuracy (%)
Perdiz (%)	79.42	0.00	8.76	3.53	1.31	23605	81.63
Monsoy 8411 (%)	0.19	100.00	0.00	0.00	0.02	3242	100.00
Monsoy 9010 (%)	15.19	0.00	81.63	6.24	0.10	7418	81.63
Kaiabi (%)	3.71	0.00	8.48	76.65	9.26	7769	76.65
Tabarana (%)	1.49	0.00	1.13	13.58	89.31	4841	89.31
User's accuracy (%)	95.00	98.57	59.77	75.25	74.60		
Overall accuracy (%)	81.76						
Kappa coefficient	0.74						

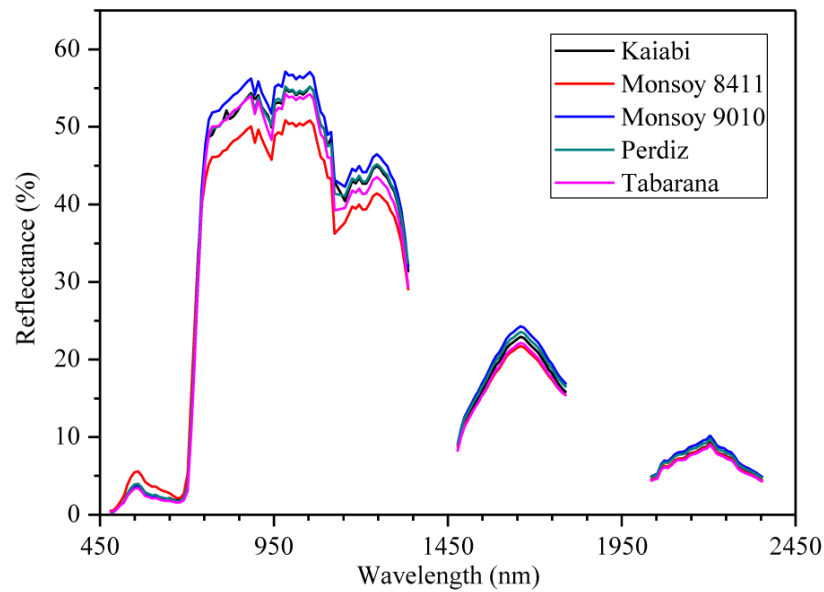


Fig.5. Hyperion reference spectra of the five studied soybean varieties.

3.3. Spectral resolution influence on the discrimination of soybean varieties

Among the simulated multispectral sensors, MODIS/Terra and ETM+/Landsat-7 presented the highest classification accuracy values (86.72% and 85.94%, respectively), whereas the AVHRR/NOAA-17 showed the lowest value (68.85% in Table 4). Kappa values ranged from 0.57 (AVHRR) to 0.81 (MODIS). ML MODIS classification accuracy and Kappa values (Table 4) were comparatively lower than Hyperion (Table 3). In this context, sensor simulation from narrow to broad bands may impact positively on classification results because of the noise Hyperion attenuation due to band resampling.

In agreement with previous results for Hyperion, inspection of the ML classified images (Fig. 6) and of the resultant confusion matrices (Table 5) for MODIS and AVHRR showed that both simulated sensors discriminated adequately Monsoy 8411. This result indicates the importance of the information on soybean planting date and phenological stage for the correct interpretation of remote sensing, as already reported by Ref. 46 and 47. Kaiabi presented the lowest producer's accuracy values for both sensors (Table 5), which was consistent with its reflectance spectrum of Fig. 5 that showed confusion with spectra of other varieties.

Table 4 – Overall classification accuracy and Kappa coefficient values derived from Maximum Likelihood (ML) classification of the five soybean varieties after the spectral resolution simulation of seven multispectral sensors.

Sensor	Overall Accuracy	Kappa Coefficient
AVHRR/NOAA-17	68.85 %	0.57
ETM+/Landsat-7	85.94 %	0.80
MODIS/Terra	86.72 %	0.81
ASTER/Terra	80.47 %	0.72
HRG/SPOT-5	76.46 %	0.67
IKONOS	82.87 %	0.76
RapidEye	82.97 %	0.76

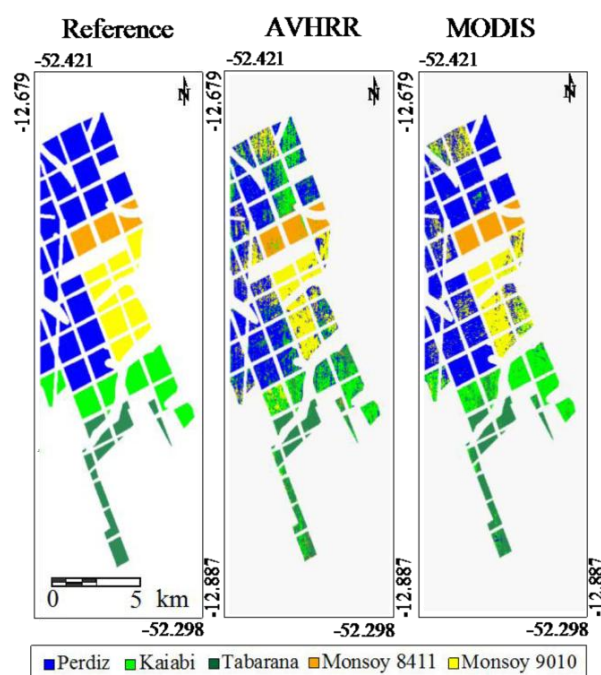


Fig. 6. Reference map of the soybean varieties and classification results for the simulated AVHRR/NOAA-17 and MODIS/Terra multispectral sensors.

Table 5. Confusion matrices for the classification of soybean varieties using the Maximum Likelihood (ML) technique applied to MODIS/Terra and NOAA/AVHRR-17 multispectral simulated sensors from Hyperion/EO-1.

MODIS/Terra							
Soybean variety	Perdiz (%)	Monsoy 8411 (%)	Monsoy 9010 (%)	Kaiabi (%)	Tabarana (%)	Total (pixels)	Producer's Accuracy (%)
Perdiz (%)	86.33	0.00	12.12	3.77	0.86	23605	86.33
Monsoy 8411 (%)	0.39	100.00	0.30	0.05	0.06	3242	100.00
Monsoy 9010 (%)	11.33	0.00	83.15	3.06	0.18	7418	83.15
Kaiabi (%)	1.58	0.00	4.23	82.97	7.75	7769	82.97
Tabarana (%)	0.37	0.00	0.20	10.14	91.15	4841	91.15
User's accuracy (%)	94.29	96.38	67.86	85.80	83.38		
Overall accuracy (%)	86.72						
Kappa coefficient	0.81						
NOAA/AVHRR-17							
Soybean variety	Perdiz (%)	Monsoy 8411 (%)	Monsoy 9010 (%)	Kaiabi (%)	Tabarana (%)	Total (pixels)	Producer's Accuracy (%)
Perdiz (%)	64.15	0.00	16.59	19.56	0.43	23605	64.15
Monsoy 8411 (%)	0.39	95.38	0.04	1.03	1.90	3242	95.38
Monsoy 9010 (%)	11.95	0.00	75.58	8.13	0.96	7418	75.58
Kaiabi (%)	19.24	3.48	5.08	56.49	13.36	7769	56.49
Tabarana (%)	4.27	1.14	2.71	14.79	83.36	4841	83.36
User's accuracy (%)	84.53	92.00	61.57	43.55	63.06		
Overall accuracy (%)	68.85						
Kappa coefficient	0.57						

4 CONCLUSIONS

The Hughes effect on the ML classification was observed, especially when more than 100 bands were included in the analysis, decreasing classification accuracy. Results from feature selection indicated the importance of the Hyperion bands positioned in the green, red edge, NIR and SWIR-1 to discriminate the five studied soybean varieties.

From the four tested classification techniques, ML and SVM presented the best results with overall classification and Kappa values of 89.80% and 0.85 and of 81.76% and 0.74, respectively. The worst performance was obtained by SAM (70.84% and 0.59). The most easily discriminated soybean variety was Monsoy 8411, because it was sensed by Hyperion at a later reproductive stage, presenting comparatively higher reflectance in the visible and lower in the NIR-SWIR-1 than the other varieties. Differences in classification performance between the techniques were associated with the better ability of ML and SVM to differentiate the Kaiabi variety when compared to the matching spectra techniques. Kaiabi presented reflectance spectra shape similarity with Tabarana and Perdiz.

Classification performance decreased from Hyperion to the simulated multispectral sensors. Among the simulated sensors from Hyperion, MODIS and ETM+ presented the highest classification accuracy whereas the AVHRR showed the lowest one. Kappa values ranged from 0.57 (AVHRR) to 0.81 (MODIS).

Results from Hyperion and the spectral resolution simulation of seven multispectral sensors demonstrated the importance of taking into account the differences in reproductive stages between the soybean varieties in discrimination studies.

Acknowledgements

The authors are very grateful to Grupo André Maggi for providing agronomic information for this research. Thanks are also due to FAPESP (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo; grant number 2008/11499-8), CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico), and to CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior).

References

- [1] F. Lacar, M. Lewis, and I. Grierson, "Use of hyperspectral imagery for mapping grape varieties in the Barossa Valley, South Australia," *Proc. IGARSS* **2001** v6, 2875 - 2877 (2001) [[doi](#): 10.1109/IGARSS.2001.978191].
- [2] P. J. Zarco-Tejada, A. Berjón, R. López-Lozano, J. R. Miller, P. Martín, V. Cachorro, M. R. González, and A. Frutos, "Assessing vineyard condition with hyperspectral indices: leaf and canopy reflectance simulation in a row structured discontinuous canopy," *Remote Sens. Environ.* **99**, 271-287 (2005) [[doi](#): 10.1016/j.rse.2005.09.002].
- [3] L. S. Galvão, A. R. Formaggio, and D. A. Tisot, "Discrimination of sugarcane varieties in Southeastern Brazil with EO-1 Hyperion data," *Remote Sens. Environ.* **94**, 523-534 (2005) [[doi](#): 10.1016/j.rse.2004.11.012].
- [4] R. Johnson, R. Viator, J. Veremis, E. Richard, and P. Zimba, "Discrimination of sugarcane varieties with hyperspectral reflectance measurements and plant pigment analysis," *J. A. Soc. Sugar Cane Technol.* **28**, 63-75 (2008).
- [5] W. B. Henry, D. R. Shaw, K. R. Reddy, L. M. Bruce, and H. D. Tamhankar, "Spectral reflectance curves to distinguish soybean from common cocklebur (*Xanthium strumarium*) and sicklepod (*Cassia obtusifolia*) grown with varying soil moisture," *Weed Sci.* **52**, 788-796 (2004) [[doi](#): 10.1614/WS-03-051R].

- [6] C. H. Koger, D. R. Shaw, K. N. Reddy, and L. M. Bruce, "Detection of pitted morningglory (*Ipomoea lacunosa*) with hyperspectral remote sensing. II. Effects of vegetation ground cover and reflectance properties," *Weed Sci.* **52**, 230-235 (2004) [doi: 10.1614/WS-03-082R].
- [7] L. S. Galvão, A. D. Roberts, A. R. Formaggio, I. Numata, and F. M. Breunig, "View angle effects on the discrimination of soybean varieties and on the relationships between vegetation indices and yield using off-nadir Hyperion data," *Remote Sens. Environ.* **113**, 846-856 (2009) [doi: 10.1016/j.rse.2008.12.010].
- [8] C. J. Gray, D. R. Shaw, and L. M. Bruce, "Utility of hyperspectral reflectance for differentiating soybean (*Glycine max*) and six weed species," *Weed Technol.* **23**:108-119 (2009) [doi: 10.1614/WT-07-117.1].
- [9] L. S. Galvão, A. R. Formaggio, and D. A. Tisot, "The influence of spectral resolution on discriminating Brazilian sugarcane varieties," *Int. J. Remote Sens.* **27**, 769-777 (2006) [doi: 10.1080/01431160500166011].
- [10] M. Ferreiro-Armán, J. P. Costa, S. Homayouni, and J. Martín-Herrero, "Hyperspectral image analysis for precision viticulture," *Lecture Notes Comput. Sci.* **4142** 730-741 (2006) [doi: 10.1007/11867661_66].
- [11] Y. Everingham, K. Lowe, D. Donald, D. Coomans, and J. Markley, "Advanced satellite imagery to classify sugarcane crop characteristics," *Agron. Sust. Develop.* **27**, 111-117 (2007) [doi: 10.1051/agro:2006034].
- [12] S. Chien, D. Silverman, A. G. Davies, and D. Mandl, "Onboard science processing concepts for the HypSIRI mission," *IEEE Intelligent Syst.* **24**, 12-19 (2009) [doi: 10.1109/MIS.2009.120].
- [13] P. Thenkabail, R. B. Smith, and E. De Pauw, "Hyperspectral vegetation indices and their relationships with agricultural crop characteristics," *Remote Sens. of Environ.* **71**, 158-182 (2000) [doi: 10.1016/S0034-4257(99)00067-X].
- [14] P. Thenkabail, "Accuracy assessments of hyperspectral waveband performance for vegetation analysis applications," *Remote Sens. Environ.* **91**, 354-376 (2004) [doi: 10.1016/j.rse.2004.03.013].
- [15] J. L. Hatfield, A. A. Gitelson, J. S. Schepers and C. L. Walthall, "Application of spectral remote sensing for agronomic decisions," *Agron. J.* **100**, S-117-S-131 (2008) [doi: 10.2134/agronj2006.0370c].
- [16] A. Miglani, S.S. Ray, R. Pandey, and J.S. Parihar, "Evaluation of EO-1 Hyperion data for agricultural applications," *J. Indian Soc. Remote Sens.* **36**, 255-266 (2009) [doi: 10.1007/s12524-008-0026-y].
- [17] J. A. Richards, *Remote Sensing Digital Image Analysis*, Berlin (1999).
- [18] F. Kruse, A. Lefkoff, J. Boardman, K. B. Heidebrecht, A. T. Shapiro, P. J. Barloon, and A. F. H. Goetz, "The Spectral Image Processing System (SIPS)—interactive visualization and analysis of imaging spectrometer data," *Remote Sens. Environ.* **44**, 145-163 (1993) [doi: 10.1063/1.44433].
- [19] Y. Wang, L. Guo, and N. Liang, "Improving the classification precision of spectral angle mapper algorithm," in H. Maître, H. Sun, B. Lei and J. Feng, Ed., *Proc. SPIE.* **7498**, 749827-6 (2009) [doi: 10.1117/12.832658].
- [20] C. Chang, "Spectral information divergence for hyperspectral image analysis," *Proc. IGARSS 1999*, v1 509-511 (1999) [doi: 10.1109/IGARSS.1999.773549].
- [21] C. Chang, *Hyperspectral imaging: Techniques for Spectral Detection and Classification*, New York (2003).
- [22] Y. Du, C. Chang, H. Ren, C. Chang, J. O. Jensen, and F. M. D'Amico, "New hyperspectral discrimination measure for spectral characterization," *Opt. Eng.* **43**, 1777-1786 (2004) [doi: 10.1117/1.1766301].
- [23] C. Cortes, and V. Vapnik, "Support-vector networks," *Mach. Learn.* **20**, 273-297 (1995) [doi: 10.1007/BF00994018].

- [24] V. Vapnik, *The nature of statistical learning theory (information science and statistics)*, 2nd ed., Berlin (1999).
- [25] Hughes, G., "On the mean accuracy of statistical pattern recognizers," *IEEE Trans. Inf. Theor.* **14**, 55-63 (1968) [doi: 10.1109/TIT.1968.1054102].
- [26] I. H. Witten, and E. Frank, *Data mining: practical machine learning tools and techniques*, San Fransisco, CA. (2005).
- [27] M. Pal, and G. M. Foody, "Feature selection for classification of hyperspectral data by SVM" *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* **48**, 2297-2307 (2010) [doi: 10.1109/TGRS.2009.2039484].
- [28] E. Ortega, O. Cavalett, R. Bonifácio, and M. Watanabe, "Brazilian soybean production: energy analysis with an expanded scope," *Bull. Sci. Technol. Soc.* **25**, 323-334 (2005) [doi: 10.1177/0270467605278367].
- [29] R. D. V. Epiphany, A. R. Formaggio, B. F. T. Rudorff, E. E. Maeda, and A. J. B. Luiz, "Estimating soybean crop areas using spectral-temporal surfaces derived from MODIS images in Mato Grosso, Brazil," *Pesq. Agropec. Bras.* **45**, 72-80 (2010) [doi: 10.1590/S0100-204X2010000100010].
- [30] J. C. Corrêa, "Effect of cropping systems on the stability of Red-Yellow Latosol aggregates in Querência, Mato Grosso, Brazil," (In Portuguese), *Pesq. Agropec. Bras.* **37**, 203-209 (2002) [doi: 10.1590/S0100-204X2002000200012].
- [31] Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA), "Soybean," (In Portuguese), EMBRAPA, Brasília (2010).
- [32] Ontario Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs (OMAFRA), Growth stages. Agronomy Guide. Pub 811 (2001).
- [33] J. S. Pearlman, S. L. Carman, C. C. Segal, P. Jarecke, P. Clancy, and W. Browne, "Overview of the Hyperion imaging spectrometer for the NASA EO-1 mission," *Proc. IGARSS 2001* v7, 3036 - 3038 (2001) [doi: 10.1109/IGARSS.2001.978246].
- [34] J. S. Pearlman, P. S. Barry, C. C. Segal, J. Shepanski, D. Beiso, and S. L. Carman, "Hyperion, a space-based imaging spectrometer," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* **41**, 1160-1173 (2003) [doi: 10.1109/TGRS.2003.815018].
- [35] J. C. Kollenkark, V. C. Vanderbilt, C. S. T. Daughtry, and M. E. Bauer, "Influence of solar illumination angle on soybean canopy reflectance," *Appl. Opt.* **21**, 1179-1184 (1982) [doi: 10.1364/AO.21.001179].
- [36] K. J. Ranson, L. L. Biehl, and M. E. Bauer, "Variation in spectral response of soybean with respect to illumination, view and canopy geometry," *Int. J. Remote Sens.* **6**, 1827-1842 (1985) [doi: 10.1080/01431168508948331].
- [37] D. G. Goodenough, A. Dyk, K. O. Niemann, J. S. Pearlman, Hao Chen, T. Han, M. Murdoch, and C. West, "Processing Hyperion and ALI for forest classification," *IEEE Trans Geosci. Remote Sens.* **41**, 1321-1331 (2003) [doi: 10.1109/TGRS.2003.813214].
- [38] G. W. Felde, G. P. Anderson, T. W. Cooley, M. W. Matthew, S. M. Adler-Golden, A. Berk, and J. Lee, "Analysis of Hyperion data with the FLAASH atmospheric correction algorithm," *Proc. IGARSS 2003* v1, 90-92 (2003) [doi: 10.1109/IGARSS.2003.1293688].
- [39] ITT - Visual Information Solutions. *ENVI. Version 4.7*. Boulder, CO: ITT Visual Information Solutions (2009).
- [40] Y. J. Kaufman, D. Tanré, L. A. Remer, E. F. Vermote, A. Chu, and B. N. Holben, "Operational remote sensing of tropospheric aerosol over land from EOS Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer," *J. Geophys. Res.* **102**, 17,051-17,067 (1997) [doi: 10.1029/96JD03988].
- [41] A. A. Green, M. Berman, P. Switzer, and M. D. Craig, "A transformation for ordering multispectral data in terms of image quality with implications for noise

- removal,” *IEEE Trans Geosci. Remote Sens.* **26**, 65-74 (1988) [doi: 10.1109/36.3001].
- [42] M. Hall, E. Frank, G. Holmes, B. Pfahringer, P. Reutemann, and I. H. Witten, “The WEKA data mining software: an update,” *SIGKDD Exp.* **11**, 10-18 (2009) [doi: 10.1145/1656274.1656278].
- [43] R. R. Bouckaert, E. Frank, M. Hall, R. Kirkby, P. Reutemann, A. Seewald, and D. Scuse, *WEKA Manual for version 3.6.0* Hamilton, New Zealand (2008).
- [44] M. A. Hall, and L. A. Smith, “Feature subset selection: a correlation based filter approach,” *Proc. 4th International Conference on Neural Information Processing and Intelligent Information Systems*, 855-858, Berlin (1997).
- [45] Hall, M.A., *Correlation-based Feature Selection for Machine Learning*, Doctoral Thesis, University of Waikato, Hamilton, New Zealand (1999).
- [46] C. P. Ferri, A. R. Formaggio, and M. A. Schiavinato, “Narrow band spectral indexes for chlorophyll determination in soybean canopies [*Glycine max* (L.) Merrill],” *Braz. J. Plant Physiol.* **16**, 131-136 (2004) [doi: 10.1590/S1677-04202004000300002].
- [47] T. Sakamoto, B. D. Wardlow, A. A. Gitelson, S. B. Verma, A. E. Suyker, and T. J. Arkebauer, “A two-step filtering approach for detecting maize and soybean phenology with time-series MODIS data,” *Remote Sens. Environ.* **114**, 2146-2159 (2010) [doi: 10.1016/j.rse.2010.04.019].

Fábio M. Breunig is a PhD student at Brazilian National Institute for Space Research (INPE). He received his BS degree in geography from Federal University of Santa Maria (Brazil) in 2002 and MS degree in remote sensing from the Brazilian National Institute for Space Research (INPE) in 2006. Currently he is working with agriculture applications of remote sensing, focusing on directional effects and radiative transfers modeling.

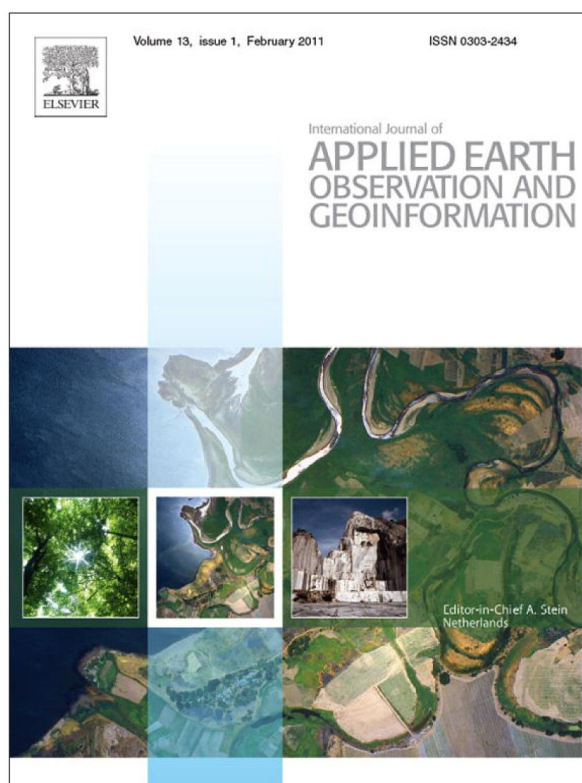
Lênio S. Galvão is a researcher at the Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) in Brazil. He is a geologist with a MS Degree in remote sensing (INPE) and a Doctor Degree in geophysics (University of São Paulo - USP). His research interest includes reflectance spectroscopy and hyperspectral remote sensing. He has performed several investigations using airborne (e.g., AVIRIS, HYMAP) and orbital (e.g., Hyperion/EO-1 and CHRIS/PROBA) imaging spectrometers.

Antonio R. Formaggio is Agronomist by Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz (ESALQ / University of São Paulo), with Master degree in Remote Sensing of Environment from the National Institute for Space Research (INPE / Ministry of Science and Technology) and with Doctor degree in Remote Sensing and Agriculture from ESALQ / University of São Paulo. He is researcher and post-graduation teacher/advisor in Remote Sensing and Environment and Agriculture since 1989. His research interests include agricultural statistics, impacts of agriculture in the environment, hyperspectral remote sensing and estimation of biophysical variables of crop canopies, environmental modeling and radiative transfer models for the retrieval of vegetation biophysical variables.

José C. N. Epiphanyo is a senior researcher at the National Institute for Space Research (INPE), in Brazil. He received his BS in agronomy from University of São Paulo (USP) in 1978, MS degree in remote sensing from INPE in 1982, and his PhD in agronomy/remote sensing from USP in 1988. He spent a sabbatical at University of Arizona in 1993/1995. He is actively involved in agriculture/remote sensing research and teaching, and coordinates the Brazilian Remote Sensing Symposia and the China-Brazil Earth Resources Satellite (CBERS) Application Program.

APÊNDICE A - Artigo publicado na revista “*International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*”.

Provided for non-commercial research and education use.
Not for reproduction, distribution or commercial use.



This article appeared in a journal published by Elsevier. The attached copy is furnished to the author for internal non-commercial research and education use, including for instruction at the authors institution and sharing with colleagues.

Other uses, including reproduction and distribution, or selling or licensing copies, or posting to personal, institutional or third party websites are prohibited.

In most cases authors are permitted to post their version of the article (e.g. in Word or Tex form) to their personal website or institutional repository. Authors requiring further information regarding Elsevier's archiving and manuscript policies are encouraged to visit:

<http://www.elsevier.com/copyright>



Contents lists available at ScienceDirect

International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation

journal homepage: www.elsevier.com/locate/jag



Directional effects on NDVI and LAI retrievals from MODIS: A case study in Brazil with soybean

Fábio Marcelo Breunig, Lênio Soares Galvão*,
Antônio Roberto Formaggio, José Carlos Neves Epiphânio

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), Divisão de Sensoriamento Remoto, Av. dos Astronautas, 1758, Caixa Postal 515, 12245-970, São José dos Campos, SP, Brazil

ARTICLE INFO

Article history:
Received 4 August 2009
Accepted 6 June 2010

Keywords:
MODIS
LAI
Soybean
Viewing geometry
NDVI

ABSTRACT

The Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) is largely used to estimate Leaf Area Index (LAI) using radiative transfer modeling (the "main" algorithm). When this algorithm fails for a pixel, which frequently occurs over Brazilian soybean areas, an empirical model (the "backup" algorithm) based on the relationship between the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) and LAI is utilized. The objective of this study is to evaluate directional effects on NDVI and subsequent LAI estimates using global (biome 3) and local empirical models, as a function of the soybean development in two growing seasons (2004–2005 and 2005–2006). The local model was derived from the pixels that had LAI values retrieved from the main algorithm. In order to keep the reproductive stage for a given cultivar as a constant factor while varying the viewing geometry, pairs of MODIS images acquired in close dates from opposite directions (backscattering and forward scattering) were selected. Linear regression relationships between the NDVI values calculated from these two directions were evaluated for different view angles (0–25°; 25–45°; 45–60°) and development stages (<45; 45–90; >90 days after planting). Impacts on LAI retrievals were analyzed. Results showed higher reflectance values in backscattering direction due to the predominance of sunlit soybean canopy components towards the sensor and higher NDVI values in forward scattering direction due to stronger shadow effects in the red waveband. NDVI differences between the two directions were statistically significant for view angles larger than 25°. The main algorithm for LAI estimation failed in the two growing seasons with gradual crop development. As a result, up to 94% of the pixels had LAI values calculated from the backup algorithm at the peak of canopy closure. Most of the pixels selected to compose the 8-day MODIS LAI product came from the forward scattering view because it displayed larger LAI values than the backscattering. Directional effects on the subsequent LAI retrievals were stronger at the peak of the soybean development (NDVI values between 0.70 and 0.85). When the global empirical model was used, LAI differences up to 3.2 for consecutive days and opposite viewing directions were observed. Such differences were reduced to values up to 1.5 with the local model. Because of the predominance of LAI retrievals from the MODIS backup algorithm during the Brazilian soybean development, care is necessary if one considers using these data in agronomic growing/yield models.

© 2010 Elsevier B.V. All rights reserved.

1. Introduction

The Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS), on board the Terra platform, was designed to provide nearly daily global coverage and a set of measurements to generate land cover products such as Leaf Area Index (LAI) (Shabanov et al., 2005). LAI, defined as one sided green leaf area per unit ground area in broadleaf canopies, is an important input parameter to monitor crop growth conditions and to improve the performance of

crop yield models (Doraiswamy et al., 2005; Mo et al., 2005; Fang et al., 2008). Because direct measurements of LAI are usually time-consuming, remote sensing is an alternative to estimate this attribute over large areas (Yi et al., 2008).

The MODIS LAI product (MOD15A2) has a 1-km spatial resolution at an 8-day composite interval and is generated using two approaches. For MODIS Collection 5, the first approach (the "main" algorithm) uses look-up tables (LUT) and an eight-biome land cover map (MOD12Q1) to achieve inversion of the 3D radiative transfer problem (Knyazikhin et al., 1998; Myneni et al., 2002; Privette et al., 2002). Biome description includes attributes such as the soil and/or understory type (Knyazikhin et al., 1999). The algorithm is designed to output LAI using as input Sun and view directions, bidirectional

* Corresponding author. Tel.: +55 12 3208 6443.
E-mail address: lenio@dsr.inpe.br (L.S. Galvão).

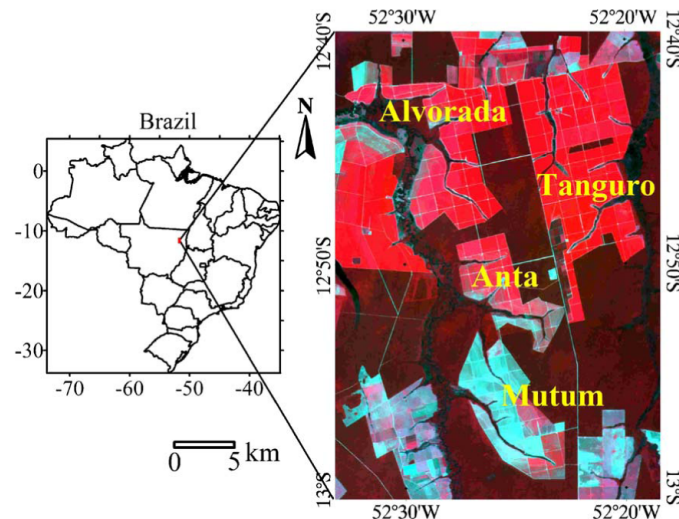


Fig. 1. Location of the four studied soybean farms in the Mato Grosso state (central Brazil). The false color composite comprises the bands 4 (NIR in red color), 3 (red in green color) and 2 (green in blue color) of the CCD camera of the China–Brazil Earth Resources Satellite (CBERS-2). (For interpretation of the references to color in this figure legend, the reader is referred to the web version of the article.)

reflectance values from different spectral bands and the land cover map (Tan et al., 2005). The second approach (the “backup” algorithm) is used when the main algorithm fails due to uncertainties in the input reflectance data or to deficiencies in model formulation (Yang et al., 2006). The backup algorithm is based on empirical relationships between the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) and LAI for each one of the biomes (Knyazikhin et al., 1999; Myneni et al., 1997).

MODIS NDVI has been used in agriculture to characterize the length of the growing seasons and to monitor crop condition (Karlsen et al., 2008; Alexandridis et al., 2008; Ren et al., 2008). Crop LAI estimates from this vegetation index is another important application but it may be affected by several factors. For example, NDVI can saturate at relatively low LAI values. Biome misclassification, when the MODIS backup algorithm is used, may also affect the accuracy of LAI retrievals (Myneni et al., 2002). Furthermore, NDVI is strongly view angle dependent for both daily and composite images (Meyer et al., 1995; Hu et al., 2000; Liesenberg et al., 2007). Field experiments have shown that NDVI varies with Sun-viewing geometry, which affects LAI inferences from this index. The magnitude of the changes is stronger for sparse than for closed canopies and better correlations between NDVI and LAI are usually observed in the backscattering direction (Epiphanio and Huete, 1995; Walter-Shea et al., 1997). Among the uncertainties to explain the performance of the backup algorithm, directional effects on NDVI and resultant LAI estimates have not been widely discussed in the literature.

In the last few decades, Brazil has experienced an impressive increase in soybean production. MODIS-derived LAI has been used by some researchers as input data for agronomic models to estimate Brazilian soybean yield (Rizzi and Rudorff, 2007). Because the soybean development is coincident with the period of cloud cover peak in Brazil, a higher frequency of pixels with LAI values calculated from the MODIS backup algorithm is usually observed when compared to the main algorithm use. However, even for cloud-free data, MODIS LAI estimates (product MOD15A2) over soybean areas in Brazil are mostly based on the backup algorithm due to failure of the main algorithm just at the peak of

soybean development between January and February (Rizzi et al., 2006).

The objective of this study is to evaluate directional effects on NDVI and subsequent LAI estimates over Brazilian soybean fields, as a function of crop development, using Collection 5 MODIS data acquired in two growing seasons (2004–2005 and 2005–2006). LAI estimates from NDVI, calculated from opposite view directions for the same reproductive stage, are compared to each other using two empirical models: a global model (Knyazikhin et al., 1999; broadleaf crops) and a local one derived from the MODIS main algorithm LAI retrievals over the soybean areas under study.

2. Methodology

2.1. Study area and agronomic data (2004–2005 and 2005–2006)

The study area includes four farms (Tanguro, Alvorada, Anta and Mutum) located in Querência municipality, Mato Grosso state, central Brazil (Fig. 1). It comprises the transition zone between the Brazilian Savannas (*Cerrado*) and the Amazonian tropical rainforest. The topography of the region is flat (350 m of altitude) and the predominant soil class is Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico (Typic Acrustox in the Soil Taxonomy). The climate is tropical with a mean temperature of 26 °C. The annual rainfall reaches up to 1850 mm with a well-defined rainy season between October and April. Inspection of TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission) data (not shown) indicated that the rainy season started earlier in October 2004 than in October 2005.

Different soybean cultivars were planted in the four farms in the 2004–2005 and 2005–2006 growing seasons. Major agronomical characteristics of the cultivars that occupied large enough areas in the farms are presented in Tables 1 and 2 for each season, respectively. In general, they were planted with a constant row spacing (0.45 m) in November and December and were harvested in March and April. Perdiz was the dominant cultivar in 2004–2005 (Table 1) and Tabarana in 2005–2006 (Table 2). Soybean yield was higher in 2005–2006 than in 2004–2005.

Table 1
Soybean development in the 2004–2005 growing season.

Farm	Soybean cultivar	Planting period	Harvest period	Average local cycle (days)	Area (ha)	Average yield (kg/ha)
Tanguro	Perdiz	30 October to 9 November	7 March to 9 April	147	4605.20	2387
Tanguro	Monsoy 9010	14–18 November	24 March to 14 April	139	2218.50	3201
Tanguro	Tabarana	9–15 November	29 March to 10 April	144	1656.90	3095
Tanguro	Monsoy 8411	29 October to 2 November	20 February to 13 March	120	562.10	3960
Tanguro	Kaiaibi	8–11 November	30 March to 10 April	146	1421.80	2784
Tanguro	Uirapuru	17–18 November	12–14 April	146	237.00	3472
Alvorada	Monsoy 9010	17–18 November	5–10 April	140	127.50	2694
Alvorada	Uirapuru	17–24 November	3–12 April	138	2643.70	2788
Alvorada	Pioneer DM-339	4–7 December	5–28 April	131	243.10	2074
Alvorada	Pioneer DM-309	1–7 December	5–29 April	134	1436.80	2132
Alvorada	Monsoy 8914	5–8 December	9–27 April	132	1231.50	1879
Anta	Monsoy 8914	6–15 December	11–22 April	126	2630.50	2214
Anta	Kaiaibi 2	13–19 December	18–19 April	124	324.80	2948
Anta	Arara Azul	14–19 December	18–21 April	124	187.00	2715
Anta	Emgopa 313	30 December	20–22 April	112	23.20	3377
Mutum	Emgopa 313	30 December to 8 January	22–28 April	111	2749.20	2045
Mutum	Arara Azul	15–27 December	19–26 April	123	1311.10	2084

Row spacing was 0.45 m.

2.2. MODIS image acquisition

Collection 5 MODIS data were obtained using the Warehouse Inventory Search Tool (WIST). For the 2004–2005 and 2005–2006 growing seasons, 29 and 42 cloud-free daily surface reflectance images (MOD09GA and MOD09GQ), acquired from October to April of each season, were selected to characterize the soybean development cycle, respectively. The MODIS Reprojection Tool (MRT) (Dwyer and Schmidt, 2006) was used to convert the sinusoidal projection into planar coordinates (UTM WGS-84).

To keep reproductive stage for a given soybean cultivar as a constant factor while varying viewing geometry, six (2004–2005) and seven (2005–2006) pairs of MODIS images acquired in close dates but from opposite view angles (backscattering and forward scattering) were selected from the total set of images and analyzed in detail (Table 3). Development stages may be different between the cultivars because they were planted in different dates. In this study, negative angles indicate backscattering (Sun behind the sensor) or the predominance of sunlit canopy components for the MODIS. Positive angles indicate the forward scattering direction (Sun in front of the sensor) with the dominance of shadowed canopy components viewed by the sensor.

2.3. Data analysis

Data analysis consisted of evaluation of directional effects as a function of crop development on MODIS: (1) daily reflectance; (2) daily NDVI; and (3) on the subsequent LAI retrievals using empirical relationships between NDVI and LAI.

Because of its large Field-of-View (FOV), MODIS sensed the soybean fields of the four farms at very different view angles, even over a short period of time. To evaluate directional effects on soybean, MODIS daily reflectance of the visible, near-infrared (NIR) and shortwave (SWIR) bands, the products MOD09GA (Surface Reflectance Daily L2G Global 1 km and 500 m) and MOD09GQ (Surface Reflectance Daily L2G Global 250 m) were used. Mean surface reflectance values of the first seven MODIS bands representing each cultivar were inspected, especially those extracted from pairs of images of the same soybean development stage (close MODIS dates) and opposite viewing directions (Table 3). Scatter plots for the relationships between the bands were obtained as a function of the backscattering and forward scattering directions.

Directional effects on MODIS daily NDVI were studied with better spatial resolution using the product MOD09GQ to provide red and NIR reflectance values for NDVI calculation. NDVI profiles for

Table 2
Soybean development in the 2005–2006 growing season.

Farm	Soybean cultivar	Planting period	Harvest period	Average local cycle (days)	Area (ha)	Average yield (kg/ha)
Tanguro	Monsoy 8914	4–9 November	6–24 March	129	3200.80	3625
Tanguro	Monsoy 8866	4–6 November	14–26 March	135	521.10	3952
Tanguro	Perdiz	25 October to 5 November	1–28 March	134	2270.70	3299
Tanguro	Tabarana	8–22 November	20 March to 9 April	135	4988.90	3911
Tanguro	Monsoy 9010	11–17 November	20 March to 9 April	136	1564.00	3685
Tanguro	Jataí	11–26 November	23 March to 13 April	134	414.00	3812
Tanguro	Uirapuru	11–12 November	23–26 March	133	188.00	3248
Alvorada	Jataí	22 November to 1 December	27 March to 13 April	128	1341.50	4015
Alvorada	Monsoy 9010	22 November to 1 December	28 March to 15 April	129	2965.50	3277
Alvorada	Tabarana	18–25 November	25 March to 10 April	133	1307.50	3642
Anta	Jataí	2–4 December	8–12 April	126	682.60	3809
Anta	Monsoy 9010	7–9 December	10–14 April	125	190.80	3499
Anta	Monsoy 9350	8–18 December	11–19 April	122	530.50	3367
Anta	Uirapuru	5–14 December	10–17 April	125	1449.10	3460
Anta	Emgopa 313	14–15 December	17 April	123	253.60	3712
Mutum	Uirapuru	6–23 December	17–26 April	127	762.50	3233
Mutum	Emgopa 313	13–23 December	16–26 April	124	2583.10	3405
Mutum	Jataí	4–11 December	4–6 April	118	579.70	3651
Mutum	Monsoy 9350	18–20 December	25–26 April	128	103.70	3430

Row spacing was 0.45 m.

Table 3

Pairs of MODIS images acquired on close days and in opposite viewing directions in the 2004–2005 and 2005–2006 growing seasons.

Backscattering date	View Zenith angle (°)	Forward scattering date	View Zenith angle (°)
2004–2005			
December 8, 2004	–5	December 6, 2004	+23
January 27, 2005	–32	January 30, 2005	+35
February 5, 2005	–42	February 6, 2005	+44
February 21, 2005	–42	February 22, 2005	+44
April 12, 2005	–56	April 11, 2005	+45
April 15, 2005	–5	April 13, 2005	+24
2005–2006			
November 9, 2005	–4	November 7, 2005	+24
December 22, 2005	–41	December 21, 2005	+59
January 16, 2006	–50	January 15, 2006	+52
January 21, 2006	–20	January 19, 2006	+9
January 23, 2006	–42	January 24, 2006	+44
January 25, 2006	–57	January 22, 2006	+58
February 8, 2006	–42	February 9, 2006	+44

the development cycle of the soybean cultivars were analyzed. Linear regression relationships between the NDVI values, calculated from opposite viewing directions (backscattering and forward scattering), were evaluated for different classes of view angles (0–25°; 25–45°; 45–60°) and development stages (<45; 45–90; >90 days after planting). Slope (β) values of the regression relationships with the intercept fixed to zero were used to evaluate statistical differences at 95% confidence level between the NDVI values calculated from distinct directions and development stages.

To determine the relative proportion of the pixels calculated from the main and backup algorithms over the four farms as a function of crop development, 23 LAI images of the product MOD15A2 (Leaf Area Index/FPAR 8-Day L4 Global 1 km) for each growing season were selected. LAI/FPAR Classification Scheme Type 3 (MOD12Q1–Land Cover Type Yearly L3 Global 500 m) was adopted for biome classification analysis. The frequency of the pixels selected by the backup algorithm from the backscattering and forward scattering directions was also examined.

Finally, a detailed analysis of the LAI retrievals was performed using empirical relationships between NDVI and LAI applied to NDVI calculated from the product MOD09GQ (Surface Reflectance Daily L2G Global 250 m). Two empirical models were tested: (1) the “global model” reported by Knyazikhin et al. (1999) for biome 3 (broadleaf crops) in the MOD15A2 Algorithm Theoretical Basis Document (ATDB); (2) the “local model” derived from 759 pixels that had LAI values calculated from the MODIS main algorithm in the 2004–2005 growing season over the farms. In order to obtain the local relationship, the products MOD09A15 (MODIS/Terra Surface Reflectance 8-Day L3 Global 500 m) and MOD12Q1 were resampled to 1 km to match the MOD15A2 product specifications. Using the regression equations to calculate LAI, the magnitude of the LAI differences was evaluated for pairs of MODIS images acquired in close dates and opposite view directions for a given soybean development stage (Table 3).

3. Results and discussion

3.1. Directional effects on MODIS daily reflectance

The anisotropy of the soybean cultivars Perdiz (Fig. 2a) and Tabarana (Fig. 2b) was expressed by strong reflectance differences between the backscattering and forward scattering directions for all the 500-m MODIS bands and development stages. Due to the predominance of sunlit canopy components towards the sensor, the backscattering direction displayed higher reflectance values than the forward scattering view (shaded canopy components viewed by the sensor). For the Tabarana cultivar (Fig. 2b), after 55 days of planting, such difference reached up to 20% in the NIR

waveband for the 50° view angle (January 15–16, 2006; Table 3). Reflectance differences of Fig. 2 due to viewing geometry were consistent with results reported by Galvão et al. (2009) using hyper-spectral off-nadir Hyperion data acquired over the Tanguro farm.

Directional effects for the 2005–2006 growing season were also clearly visible when red and NIR surface reflectance values from 42 daily 250 m MODIS images were plotted for all soybean fields, view angles and dates under analysis (Fig. 3). The relationships were non-linear and produced two distinct clusters for the backscattering (higher reflectance) and forward scattering (lower reflectance) directions with slight differences in coefficient of determination (R^2) values. Spectral reflectance differences between both directions were smaller just a few days after planting (predominance of exposed soil), increased with crop development (low LAI-circle

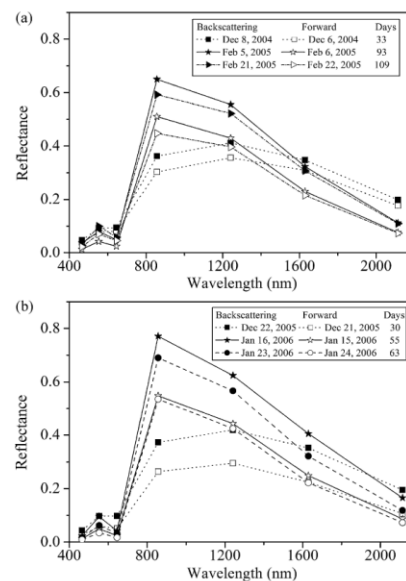


Fig. 2. MODIS surface reflectance spectra of the soybean cultivars (a) Perdiz (Tanguro farm; 2004–2005 growing season) and (b) Tabarana (Alvorada farm; 2005–2006) for different days after planting and opposite view angles. The symbols indicate the center of the MODIS bands.

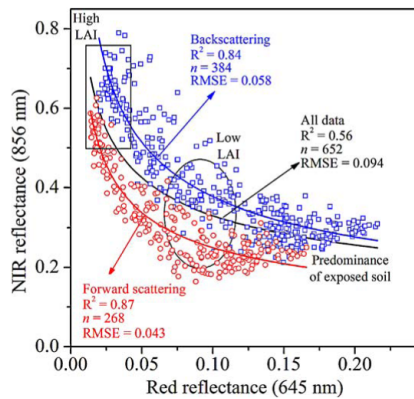


Fig. 3. Relationship between the red and NIR surface reflectance values from 42 daily 250-m MODIS images for all soybean fields, view angles and dates under analysis in the 2005–2006 growing season.

in Fig. 3) and decreased again with canopy closure (high LAI rectangle). These two clusters were also observed in the other plots between the visible, NIR and SWIR MODIS bands confirming the strong reflectance changes due to viewing geometry in the studied wavelength region.

3.2. Directional effects on MODIS daily NDVI

Because the red radiation is much more affected by shadows than the NIR radiation (Leblon et al., 1996), 250-m MODIS NDVI values calculated from the forward scattering direction were usually higher than those derived from the backscattering view (Fig. 4). As illustrated in the vegetation index profile of the cultivar Emgopa (Mutum farm) for the 2004–2005 growing season, NDVI differences due to directional effects were larger at earlier development stages and decreased with canopy closure. The largest MODIS NDVI difference was observed after 23 days of planting with a value of 0.13. This value is much larger than the uncertainties in MODIS NDVI determination, which were estimated to be ± 0.01 units for NDVI under normal atmospheric conditions and for a 2% reflectance calibration uncertainty (Miura et al., 2000). In a study by Hu et al. (2000) using the Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR), NDVI differences due to view angles ranged from 0.07 (forest) to 0.15 (grasslands). Meyer et al. (1995) reported differences up to 0.15 within a 10-day period solely due to angular effects.

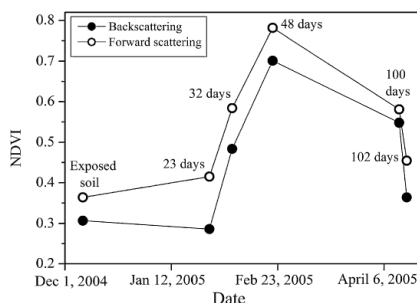


Fig. 4. NDVI variation of the soybean cultivar Emgopa (Mutum farm) for pairs of MODIS images acquired at the same development stage (consecutive days) and in opposite view directions. Days after planting are indicated. View angles and dates are listed in Table 3 (2004–2005 growing season).

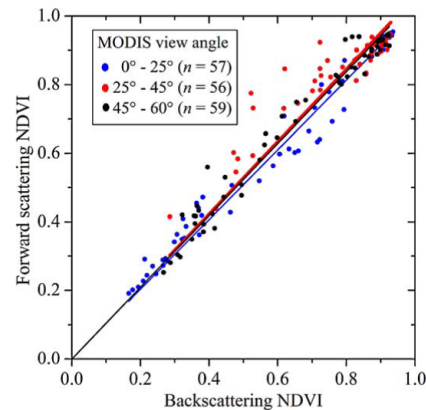


Fig. 5. Regression relationship with intercept fixed to zero between NDVI values calculated from the backscattering and forward scattering directions for three classes of view angles. MODIS 250-m images from the 13 pairs of dates of Table 3 and all soybean cultivars were used in the calculation.

Results of Fig. 4 derived from orbital level agreed also with those obtained from field experiments by Epiphanyo and Huete (1995) and Walter-Shea et al. (1997), who demonstrated that directional effects on NDVI were stronger on sparse canopies and decreased with increasing LAI.

In the analysis of directional effects on NDVI, linear regression relationships between the 250-m MODIS NDVI values calculated from the backscattering and forward scattering directions, with the intercept fixed to zero, showed slope (β) variations for different classes of view angles (0–25°; 25–45°; 45–60°). At a first glance, such variations seem to be small (Fig. 5). However, they can be expressive when used to derive LAI values. The slope values increased from the first (0–25°) to the other two view angle classes. Statistical analysis at 95% confidence level showed that there were no significant differences between the NDVI values calculated from both scattering directions for view angles lower than 25° (Table 4). However, there was significant difference for view angles greater than 25°, as indicated by lower and upper confidence level values larger than 1 in Table 4. Inspection of NDVI values for the Emgopa cultivar (Mutum farm), calculated from close dates (February 21 and 22, 2005) and opposite view angles (–42° and +44°, respectively), showed the predominance of higher NDVI values in the forward scattering direction (dominance of reddish shades in Fig. 6b) than in the backscattering (Fig. 6a). NDVI differences between the two view directions reached values up to 0.13 (red color in Fig. 6c). When analyzed as a function of the days after planting, results were not conclusive probably because distinct cultivars had different growing development rates after planting (Table 5).

3.3. Viewing geometry, soybean development and daily LAI estimates using empirical relationships

For both growing seasons, the frequency of the pixels over the soybean farms with Collection 5 LAI values (product MOD15A2) calculated from the MODIS backup algorithm increased with gradual soybean growth in central Brazil (Fig. 7). Maximum frequency values of 81% (2004–2005) and 94% (2005–2006) were observed at maximum canopy development between January and February, which is also coincident with the peak of regional cloud cover. Results of Fig. 7 were in agreement with those reported by Rizzi et al. (2006) with Collection 4 MODIS LAI product in southern Brazil, who discussed the role played by biome misclassification on LAI

Table 4

Directional effects on MODIS NDVI values calculated from backscattering and forward scattering directions as a function of three view angle classes. n is the number of pairs of NDVI from opposite view directions for the 13 dates listed in Table 3.

Angular class	n	Slope (β)	Lower confidence level (β)	Upper confidence level (β)
0–25°	57	1.01673	0.99764	1.03582
25–45°	56	1.05596*	1.03308	1.07885
45–60°	59	1.04724*	1.03141	1.06308

* Statistically different NDVI values between both view directions at 95% significance level.

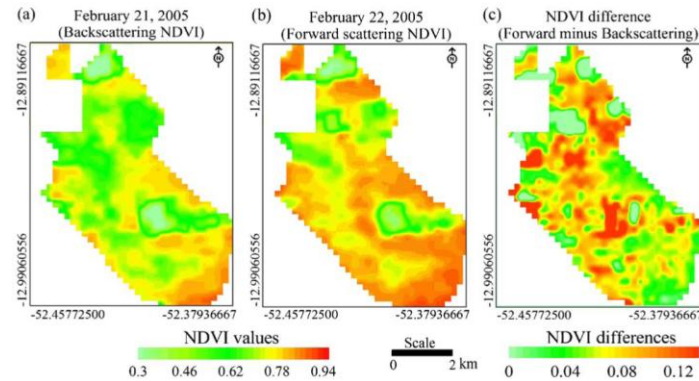


Fig. 6. Spatial variation in NDVI (Mutum farm) for the same development stage in the (a) backscattering and (b) forward scattering directions. NDVI differences between both directions are shown in (c).

Table 5

Directional effects on MODIS NDVI values calculated from backscattering and forward scattering directions as a function of crop development and view angle classes. n is the number of pairs of NDVI from opposite view directions for the 13 dates listed in Table 3.

Angular class	Days after planting	n	Slope (β)	Lower confidence level (β)	Upper confidence level (β)
0–25°	<45	18	1.02847	0.99151	1.06542
0–25°	45–90	13	1.02593*	1.00332	1.04854
0–25°	>90	8	1.03875*	1.00349	1.07401
25–45°	<45	9	1.15445*	1.04800	1.26090
25–45°	45–90	10	1.00530	0.98858	1.02202
25–45°	>90	33	1.05230*	1.03067	1.07394
45–60°	<45	23	1.06063*	1.00991	1.11135
45–60°	45–90	28	1.03617*	1.02019	1.05214
45–60°	>90	8	0.97177	0.93778	1.00576

* Statistically different NDVI values between both view directions at 95% significance level.

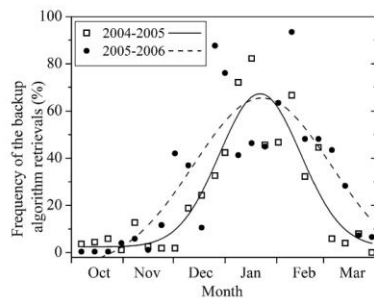


Fig. 7. Frequency of the pixels that had LAI values calculated by the MODIS backup algorithm over the four soybean farms. The frequency was determined from 23 images of the 8-day LAI product MOD15A2 for each growing season. A Gauss function was used to facilitate interpretation of results.

retrievals. In our study area, inspection of the land cover product (MOD12Q1) showed that 45% (2004–2005) and 76% (2005–2006) of the pixels over the four soybean farms were correctly classified as biome 3 (broadleaf crops). Misclassification of broadleaf crops as another biome can yield a completely different LAI estimate for the same input reflectance values. Besides biome misclassification, there are several other factors that can affect the quality of LAI retrievals such as the reflectance saturation in dense canopies and the scale dependence of the algorithm. Failure of the main algorithm is usually associated with uncertainties in input surface reflectance (e.g., atmospheric correction) and in model formulation (Myneni et al., 2002). According to Myneni et al. (2002), for successful retrievals, the surface reflectance ranges from about 0.02–0.16 in the red band and 0.10–0.42 in the NIR band. At the peak of crop development in the study area, the soybean was characterized by a very small reflectance in the MODIS red band (lower than 0.04) and by a very strong reflectance in the NIR band (higher than 0.50).

Comparison between local and global empirical relationships showed major differences between the curves for NDVI values between 0.70 and 0.85 (dashed area in Fig. 8). LAI retrievals from

Table 6

NDVI and LAI differences calculated from the global empirical relationship for pairs of MODIS images acquired on close days (same development stage) and in opposite viewing directions (backscattering and forward scattering) in the 2004–2005 growing season for the soybean cultivar Monsoy 8914.

Back date	Back view angle (°)	Back NDVI	Forward date	Forward view angle (°)	Forward NDVI	NDVI difference (forward minus back)	LAI back	LAI forward	LAI difference (forward minus back)	Days after planting
<i>Monsoy 8914 (2004–2005; Anta farm)</i>										
December 08, 2004	–5	0.467	December 06, 2004	+23.24	0.507	0.040	1.096	1.195	0.099	4
January 27, 2005	–32	0.618	January 30, 2005	+35.04	0.731	0.113	1.220	3.312	2.092	47
February 05, 2005	–42	0.745	February 06, 2005	+44.46	0.871	0.125	3.814	6.528	2.714	60
February 21, 2005	–42	0.410	February 22, 2005	+44.16	0.423	0.013	0.838	0.902	0.064	76
April 15, 2005	–5	0.329	April 13, 2005	+23.61	0.353	0.024	0.582	0.623	0.041	129

Numbers in bold indicate the largest NDVI values and LAI differences.

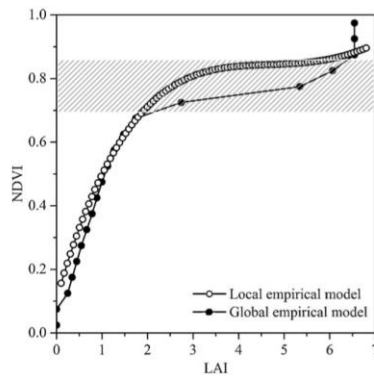


Fig. 8. Local and global (Knyazikhin et al., 1999; broadleaf crops) empirical models between NDVI and LAI. Note that small NDVI variations in the dashed area may produce very different LAI retrievals.

the local model were strongly linearly correlated with Collection 5 LAI estimates from the backup algorithm ($r=+0.95$). MODIS daily LAI estimates using the global and local regression relationships showed higher values in the forward scattering direction (Fig. 9), because this direction presented larger NDVI values than the backscattering view (Fig. 4). This explains the fact that most of the pixels selected over the farms by the backup algorithm (maximum value procedure) for the 8-day LAI images (product MOD15A2) came from the forward view in January and February (e.g., 87.6% for composition centered on January 17, 2006; Fig. 7). Thus, this procedure may result in pixel selection due to directional

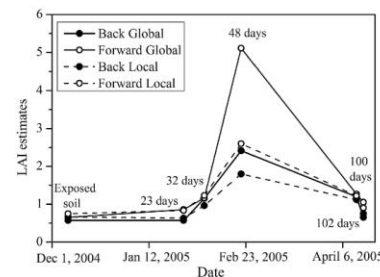


Fig. 9. MODIS LAI retrievals of the soybean cultivar Emgopa (Mutum farm; 2004–2005) using the global (solid lines) and local (dashed lines) regression relationships between NDVI and LAI. Days after planting are indicated. Estimates are plotted for pairs of images acquired at the same crop development and in opposite view directions (see Table 3 for dates and view angles).

rather than atmospheric effects, as discussed by Meyer et al. (1995), and in resultant LAI overestimates. In Fig. 4, NDVI differences due to directional effects were larger at earlier reproductive stages (23 days after planting), as expected from the literature (Epiphanyo and Huete, 1995; Walter-Shea et al., 1997). However, in Fig. 9, LAI differences were larger just at the peak of the soybean development (48 days after planting). As deduced from Fig. 8, small NDVI variations due to directional effects at high canopy closure (dashed area with NDVI between 0.70 and 0.85) may actually produce greater LAI differences than larger NDVI variations at sparser canopies (NDVI lower than 0.5). Similar results were obtained for other soybean cultivars that presented the largest LAI differences between both viewing directions associated with the same NDVI interval (Table 6).

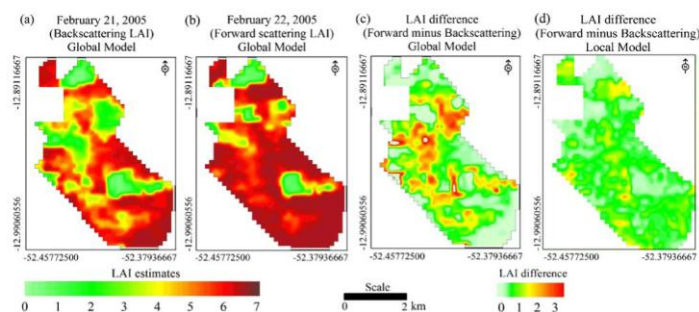


Fig. 10. Spatial variation in LAI retrievals (Mutum farm) using the global empirical relationship for the same development stage in the (a) backscattering and (b) forward scattering directions. LAI differences between both directions are shown in (c) and (d) for the global and local empirical models, respectively.

The Emgopa cultivar predominated in the Mutum farm in the 2004–2005 growing season. LAI retrievals over this farm using the global regression relationship of Fig. 8, applied to consecutive days (February 21 and 22, 2005) with opposite view angles (-42° and $+44^\circ$, respectively), confirmed the predominance of higher LAI values in the forward scattering (dominance of reddish shades in Fig. 10b) than in the backscattering (Fig. 10a). LAI differences between the two view directions reached values up to 3.2 (red color in Fig. 10c), which were reduced to values up to 1.5 when the local relationship was used in the calculations (Fig. 10d). In both cases (global and local empirical models), results indicated the importance of the directional effects on estimating this parameter from NDVI.

4. Conclusions

When the soybean cultivars were sensed by the MODIS at the same development stage and from opposite view directions, the backscattering direction displayed higher reflectance values than the forward scattering view with differences up to 20% in the NIR band (856 nm). Because the directional effects were stronger in the red waveband, MODIS NDVI values were higher in the forward scattering than in the backscattering with differences statistically significant for view angles higher than 25° .

The MODIS main algorithm for LAI retrieval increasingly failed in the two growing seasons (2004–2005 and 2005–2006) with gradual crop development at the four soybean farms studied. In other words, the frequency of pixels that had LAI values (product MOD15A2) calculated from the backup algorithm gradually increased towards high canopy closure reaching up to 94% between January and February. This period is also coincident with the peak of regional cloud cover. Besides the several factors that potentially affect the quality of LAI retrievals (e.g., biome misclassification, reflectance saturation and scale dependence of the algorithm), the very strong NIR reflectance (higher than 0.50) at high soybean canopy closure and uncertainties in the input surface reflectance may explain the main algorithm failure with crop development. Further investigation is necessary to determine precisely the causes of this failure with soybean development.

LAI values retrieved from the forward scattering direction predominated in the 8-day LAI product images (MOD15A2), because the NDVI was higher in this direction. The greatest impacts of directional effects on the subsequent LAI retrievals from NDVI were observed just at the peak of the soybean development. For the same reproductive stage (consecutive days), NDVI differences up to 0.13 were observed between the forward scattering and backscattering views for well-developed canopies. Such differences produced LAI variations up to 3.2 in the Mutum farm for NDVI values between 0.70 and 0.85 when the global empirical relationship between NDVI and LAI was used for LAI retrievals. The use of a local empirical model, obtained over the farms from 759 pixels that had LAI values estimated from the MODIS main algorithm in the 2004–2005 growing season, reduced LAI variations to values up to 1.5. However, in both cases (global and local empirical models), directional effects on NDVI and resultant LAI estimates were still significant.

Acknowledgements

The authors are grateful to Grupo André Maggi for providing the agronomical data necessary for this investigation, and to the anonymous Reviewers for the useful suggestions that improved the manuscript. Thanks are also due to some Brazilian science foundations: Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) (2008/11499-8), Coordenação de Aperfeiçoamento

de Pessoal de Nível Superior (CAPES) and Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

References

- Alexandridis, T.K., Gitas, I.Z., Silleos, N.G., 2008. An estimation of the optimum temporal resolution for monitoring vegetation condition on a nationwide scale using MODIS/Terra data. *International Journal of Remote Sensing* 29, 3589–3607.
- Doraiswamy, P.C., Sinclair, T.R., Hollinger, S., Akhmedov, B., Stern, A., Prueger, J., 2005. Application of MODIS derived parameters for regional crop yield assessment. *Remote Sensing of Environment* 97, 192–202.
- Dwyer, J., Schmidt, G., 2006. The MODIS reprojection tool. In: Qu, J.J., Gao, W., Kafatos, M., Murphy, R.E., Salomonson, V.V. (Eds.), *Earth Science Satellite Remote Sensing*. Springer, Berlin, Heidelberg, pp. 162–177.
- Epiphanio, J.C.N., Huete, A.R., 1995. Dependence of NDVI and SAVI on Sun/sensor geometry and its effect on FAPAR relationships in alfalfa. *Remote Sensing of Environment* 51, 351–360.
- Fang, H.L., Liang, S.L., Hoogenboom, C., Teasdale, J., Cavigelli, M., 2008. Corn-yield estimation through assimilation of remotely sensed data into the CSM-CERES-Maize model. *International Journal of Remote Sensing* 29, 3011–3032.
- Galvão, L.S., Roberts, D.A., Formaggio, A.R., Numata, I., Breunig, F.M., 2009. View angle effects on the discrimination of soybean varieties and on the relationships between vegetation indices and yield using off-nadir Hyperion data. *Remote Sensing of Environment* 113, 846–856.
- Hu, B., Lucht, W., Strahler, A.H., Schaaf, C.B., Smith, M., 2000. Surface albedos and angle-corrected NDVI from AVHRR observations of South America. *Remote Sensing of Environment* 71, 119–132.
- Karlsen, S.R., Tolvanen, A., Kubin, E., Poikolainen, J., Hogda, K.A., Johansen, B., Danks, F.S., Aspholm, P., Wielgolaski, F.E., Makarova, O., 2008. MODIS NDVI-based mapping of the length of the growing season in northern Fennoscandia. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 10, 253–266.
- Knyazikhin, Y., Martonchik, J.V., Myneni, R.B., Diner, D.J., Running, S.W., 1998. Synergistic algorithm for estimating vegetation canopy leaf area index and fraction of absorbed photosynthetically active radiation from MODIS and MISR data. *Journal of Geophysical Research* 103(D4) 32, 32257–32276.
- 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., 1999. MODIS Leaf Area Index (LAI) and Fraction of Photosynthetically Active Radiation Absorbed by Vegetation (FPAR) Product (MOD15). Algorithm Theoretical Basis Document. NASA Goddard Space Flight Center, Greenbelt, MD 20771, USA.
- Liesenberg, V., Galvão, L.S., Ponzoni, F.J., 2007. Variations in reflectance with seasonality and viewing geometry: implications for classification of Brazilian savanna physiognomies with MISR/Terra data. *Remote Sensing of Environment* 107, 276–286.
- Leblon, B., Gallant, L., Granberg, H., 1996. Effects of shadowing types on ground-measured visible and near-infrared shadow reflectances. *Remote Sensing of Environment* 58, 322–328.
- Meyer, D., Verstraete, M., Pinty, B., 1995. The effect of surface anisotropy and viewing geometry on the estimation of NDVI from AVHRR. *Remote Sensing Reviews* 12, 3–27.
- Miura, T., Huete, A.R., Yoshioka, H., 2000. Evaluation of sensor calibration uncertainties on vegetation indices for MODIS. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 38, 1399–1409.
- Mo, X., Liu, S., Lin, Z., Xu, Y., Xiang, Y., Mcvicar, T.R., 2005. Prediction of crop yield, water consumption and water use efficiency with a SVAT-crop growth model using remotely sensed data on the North China Plain. *Ecological Modelling* 183, 301–322.
- Myneni, R.B., Nemani, R.R., Running, S.W., 1997. Estimation of global leaf area index and absorbed PAR using radiative transfer models. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 35, 1380–1393.
- Myneni, R.B., Hoffman, S., Knyazikhin, Y., Privette, J.L., Glassy, J., Tian, Y., Wang, Y., Song, X., Zhang, Y., Smith, G.R., Lotsch, A., Friedl, M., Morisette, J.T., Votava, P., Nemani, R.R., Running, S.W., 2002. Global products of vegetation leaf area and fraction absorbed PAR from year one of MODIS data. *Remote Sensing of Environment* 83, 214–231.
- Privette, J.L., Myneni, R.B., Knyazikhin, Y., Mukelabai, M., Roberts, G., Tian, Y., Wang, Y., Leblanc, S.G., 2002. Early spatial and temporal validation of MODIS LAI product in the Southern Africa Kalahari. *Remote Sensing of Environment* 83, 232–243.
- Ren, J.Q., Chen, Z.X., Zhou, Q.B., Tang, H.J., 2008. Regional yield estimation for winter wheat with MODIS-NDVI data in Shandong, China. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 10, 403–413.
- Rizzi, R., Rudorff, B.F.T., 2007. MODIS sensor images associated with an agronomic model to estimate soybean grain yield. *Pesquisa Agropecuária Brasileira* 42, 73–80 (in Portuguese).
- Rizzi, R., Rudorff, B.F.T., Shimabukuro, Y.E., Doraiswamy, P.C., 2006. Assessment of MODIS LAI retrievals over soybean crop in Southern Brazil. *International Journal of Remote Sensing* 27, 4091–4100.
- Shabanov, N.V., Huang, D., Yang, W., Tan, B., Knyazikhin, Y., Myneni, R.B., Ahl, D.E., Gower, S.T., Huete, A.R., Aragão, L.E.O.C., Shimabukuro, Y.E., 2005. Analysis and optimization of the MODIS leaf area index algorithm retrievals over broadleaf forests. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 43, 1855–1865.
- Tan, B., Hu, J., Huang, D., Yang, W., Zhang, P., Shabanov, N.V., Knyazikhin, Y., Nemani, R.R., Myneni, R.B., 2005. Assessment of the broadleaf crops leaf area index product from the Terra MODIS instrument. *Agricultural and Forest Meteorology* 135, 124–134.

- Walter-Shea, E.A., Privette, J., Cornell, D., Mesarch, M.A., Hays, C.J., 1997. Relations between directional spectral vegetation indices and leaf area and absorbed radiation in alfalfa. *Remote Sensing of Environment* 61, 162–177.
- Yang, W., Huang, D., Tan, B., Stroeve, J.C., Shabanov, N.V., Knyazikhin, Y., Nemani, R.R., Myneni, R.B., 2006. Analysis of leaf area index and fraction of PAR absorbed by vegetation products from the Terra MODIS sensor: 2000–2005. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 44, 1829–1842.
- Yi, Y., Yang, D., Huang, J., Chen, D., 2008. Evaluation of MODIS surface reflectance products for wheat leaf area index (LAI) retrieval. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing* 63, 661–677.

APÊNDICE B - Artigo submetido e em avaliação na revista “*Anais da Academia Brasileira de Ciências*”. Em avaliação em 25/01/2011.

FRONT PAGE

Title: **Variation of MODIS Reflectance and Vegetation Indices with Viewing Geometry and Soybean Development**

Authors: Fábio Marcelo Breunig, Lênio Soares Galvão, Antônio Roberto Formaggio and José Carlos Neves Epiphanyo

Professional address: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), Divisão de Sensoriamento Remoto, Caixa Postal 515, 12245-970, São José dos Campos, SP, Brazil.

Key words: MODIS, EVI, NDVI, remote sensing, soybean.

Running title: Directional Effects and MODIS Vegetation Indices

Academy Section to which the content of the work belongs: **Earth Science**

Correspondence author:

Fábio Marcelo Breunig

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE)

Divisão de Sensoriamento Remoto

Caixa Postal 515

Av. dos Astronautas, 1748, Bairro Jardim da Granja, São José dos Campos (SP).

CEP. 12245-970.

E-mail: breunig@dsr.inpe.br

Phone: 12 3208-6443.

Abstract

Directional effects introduce variability in vegetation index determination, especially when large field-of-view sensors, like the Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS), are used. In this study, we evaluated directional effects on MODIS reflectance and four vegetation indices (NDVI, EVI, NDWI₁₆₄₀ and NDWI₂₁₂₀) with soybean development in two growing seasons (2004-2005 and 2005-2006). To keep reproductive stage for a given cultivar as a constant factor while varying viewing geometry, pairs of images obtained in close dates and opposite view angles were analyzed. By using a non-parametric statistical approach with associated bootstrapping resampling and by normalizing these indices for angular differences between the viewing directions, their sensitivity to directional effects was studied. Results showed that the temporal variation in MODIS reflectance between consecutive phenological stages was generally smaller than that resultant from viewing geometry. The reflectance of the first seven MODIS bands was higher in the backscattering, but the vegetation indices had larger values in the forward scattering direction. Directional effects decreased with canopy closure. NIR-visible based indices (NDVI and EVI) were lesser affected by directional effects than NIR-SWIR indices (NDWI₁₆₄₀ and NDWI₂₁₂₀). NDVI presented the smallest differences between the backscattering and forward scattering directions for a fixed phenological stage.

1. INTRODUCTION

In Earth science studies with satellite images, vegetation indices are generally used to characterize the dynamics of vegetation and estimate biophysical attributes such as Leaf Area Index (LAI) (Knyazikhin et al. 1998, Myneni et al. 2002, Jackson et al. 2004, Rizzi et al. 2006, Yi et al. 2008, Jiang et al. 2010). In theory, an ideal vegetation index should maximize the green vegetation response while minimizing the influence of other undesirable factors on canopy reflectance (e.g., soil background, atmosphere, and directional effects). In practice, this ideal index does not exist, which explains the great number of indices proposed after the first publication of the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) (Rouse et al. 1973). For example, when compared to NDVI,

the Enhanced Vegetation Index (EVI) was formulated to improve the sensitivity to high biomass and to reduce the atmosphere and soil background effects (Huete et al. 2002, Jiang et al. 2008). The Normalized Difference Water Index (NDWI) was designed to detect green vegetation through indirect measurement of the leaf/canopy water content (Gao 1996, Jackson et al. 2004). In spite of these modifications, most of the vegetation indices are still sensitive to directional effects (Wardley 1984, Myneni and Williams 1994, Epiphanio and Huete 1995, Walter-Shea et al. 1997, Aparicio et al. 2004, Chen et al. 2005, Galvão et al. 2009, and references therein).

Directional effects are dependent on the wavelength, canopy architecture, phenological stage, atmosphere, and the scale (Miura et al. 2000, Gao et al. 2003, Doraiswamy et al. 2005, Jiang et al. 2010). Directional effects are especially important when using large field-of-view (FOV) sensors (Meyer et al. 1995), like the Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS), onboard the Terra and Aqua platforms (Xiong et al. 2005). MODIS has bands that enable the calculation of NDVI, EVI and NDWI. This instrument is very important for global scale studies because its nearly daily coverage increases the chances of acquiring cloud-free images for adequate temporal series analysis. On the other hand, for the same vegetation type and phenological stage, changes in MODIS illumination-viewing geometry (solar and sensor azimuth and zenith angles) can result in strong reflectance differences for the sensor that impact on vegetation index determination and on resultant LAI estimates. LAI estimates can be critical over Brazilian soybean areas because the crop development is coincident with the peak of cloud cover. As a result, most of the MODIS LAI estimates (e.g. MOD15 product) are performed using empirical relationships between NDVI and LAI (the "Backup Algorithm") rather than radiative transfer modeling (the "Main Algorithm") (Rizzi and Rudorff 2007, Rizzi et al. 2006). Alternatively, LAI can be estimated from NDWI or EVI but there are no studies addressing the sensitivity of these indices to directional effects when compared to NDVI.

In this investigation, a temporal series of MODIS images was used to evaluate directional effects on reflectance and vegetation indices (NDVI, EVI and NDWI) as a function of the soybean development in two growing seasons (2004-2005 and 2005-

2006). The objective was to identify the less affected vegetation index by such effects.

2. MATERIALS AND METHODS

2.1. Study area and agronomic data

The study area (*Tanguro* farm) is located in Querência municipality, Mato Grosso state (central Brazil), between the coordinates S12.679/W52.421 (upper left corner) and S12.887/W52.298 (lower right corner). This area is characterized by a flat topography (350 m of altitude) with the predominance of Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico (Typic Acrustox in the USA Soil Taxonomy). The climate is tropical with mean temperature of 26°C and annual rainfall of 1850 mm. The native vegetation comprises the transition between savannas (*Cerrado*) and Amazonian tropical rainforest.

Five soybean cultivars predominated at the Tanguro farm in the two growing seasons (2004-2005 and 2005-2006) (Table 1). Most of the cultivars were planted with constant row spacing (45 cm) in the beginning of November and harvested at the end of March. In general, maximum crop development was observed between January and February. Perdiz was the dominant cultivar in both seasons. Inspection of TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission) data showed that the rainy season started earlier in 2004-2005.

Table 1

2.2. MODIS reflectance data

The investigation was performed using MODIS daily surface reflectance images and derived vegetation indices (NDVI, EVI and NDWI). The Collection 5 product “Surface Reflectance Daily L2G Global 1km and 500m” (MOD09GA) was obtained from the Warehouse Inventory Search Tool (WIST). The MODIS Reprojection Tool (MRT) (Dwyer and Schmidt 2006) converted the sinusoidal projection into planar coordinates (UTM WGS-84). A total of 19 (2004-2005) and 20 (2005-2006) cloud free images with pixel size of 500 m was selected from November to March of each season. A detailed list of the 20 images representing the 2005-2006 growing season (planting to

the harvest period) is presented in Table 2. Negative angles indicate backscattering (Sun behind the sensor) or the predominance of sunlit canopy components for the MODIS. Positive angles indicate forward scattering (sensor in front of the Sun) with the predominance of shadowed canopy components for the sensor.

Table 2

2.3. Data analysis

Three main steps were used in data analysis: a) analysis of the reflectance and vegetation index variation as a function of the soybean development; b) evaluation of the directional effects on reflectance and vegetation indices for fixed phenological stages; and c) sensitivity analysis of the vegetation indices to directional effects. MODIS band positioning and equations/references for the studied vegetation indices are presented in Table 3. Unfortunately, the original formulation of NDWI (Gao 1996) could not be applied to MODIS due to stripping (noisy data) associated with band 5 (1230-1250 nm). We then used two NDWI variants proposed by Chen et al. (2005) to address this problem, in which MODIS band 5 was replaced in the Gao's equation by bands 6 (1628-1652 nm; henceforth named $NDWI_{1640}$) and 7 (2105-2155 nm; $NDWI_{2120}$).

Table 3

In the first step, we used the first seven MODIS bands to characterize temporal variation in reflectance and plotted the derived NDVI, EVI, $NDWI_{1640}$ and $NDWI_{2120}$ for different soybean cultivars. A total of 70 (2004-2005) and 72 (2005-2006) agricultural fields of the soybean varieties had their reflectance values extracted and vegetation indices calculated for each one of the dates comprising the life cycle of soybean (Table 1). Results with the crop development were analyzed considering the viewing direction of MODIS data acquisition (backscattering and forward scattering).

In order to keep reproductive stage for a given soybean cultivar as a constant factor whilst varying viewing geometry, two pairs of images obtained at opposite view angles

and consecutive dates were analyzed in the second step to evaluate directional effects on reflectance and vegetation indices. For example, dates in *italic* in Table 2 indicated pairs of images selected for the 2005-2006 growing season (December 21 and 22, 2005; January 23 and 24, 2006). Scatter plots of the reflectance and vegetation indices were then generated for each pair of dates representing incomplete and closed soybean canopies as a function of viewing direction.

The last step in data analysis included the use of two different approaches to evaluate the sensitivity of vegetation indices to directional effects. First, a statistical approach based on the non-parametric Wilcoxon Signed Ranks Test (WSRT) (Wilcoxon 1945) was used to verify differences between the vegetation indices calculated from consecutive dates (same phenological stage) and opposite viewing directions (backscattering and forward scattering). In order to reduce the impact of the small sample size and strength the analysis, bootstrap analysis with 1000 repetitions was adopted. Inspection of Z and p -values provided an indication of the differences of a given vegetation index between the populations (backscattering and forward scattering). The second approach in the sensitivity analysis was based on the angular normalization of the four vegetation indices calculated for the same reproductive stage and from opposite view directions through the equation: $(VI_{\text{forward scattering}} - VI_{\text{backscattering}}) / (VI_{\text{forward scattering}} + VI_{\text{backscattering}})$. Angular differences close to zero indicate lesser sensitivity of the vegetation indices to directional effects. To take into consideration the impact of other potential factors on results (e.g., atmosphere residual effects and pixel mixture), the frequency of the pixels with the lowest angular differences for each index was computed. Results from the two approaches (Wilcoxon Signed Ranks Test and angular normalization) were compared to each other.

3. RESULTS AND DISCUSSION

3.1. Temporal variation in soybean reflectance and vegetation indices

Temporal variation in MODIS reflectance between consecutive phenological stages was generally smaller than that resultant from viewing geometry. From December 21, 2005 (incomplete canopy; 42 days after planting) to January 24, 2006

(closed canopy; 76 days), the cultivar Perdiz showed reflectance differences up to 4% in the NIR interval (MODIS band 2; 841-876 nm) due to distinct phenological stages (Figure 1). Such differences increased to values up to 20% when this soybean cultivar was sensed by MODIS at the same phenological stage but with opposite backscattering (e.g., -42° view angle for January 23, 2006) and forward scattering (e.g., $+44^{\circ}$ view angle for January 24, 2006) directions (Figure 1).

Figure 1

As expected, the reflectance of the first seven studied MODIS bands was much higher in the backscattering direction due to larger amounts of sunlit canopy components viewed by the sensor. For example, in spite of the view angles listed in Table 2, the MODIS red (Figure 2a) and NIR (Figure 2b) reflectance values were always higher in the backscattering direction along the entire cycle of soybean development in 2005-2006, including the planting period. A similar pattern was observed in 2004-2005.

After the NDVI calculation (Figure 3a), spectral differences due to viewing geometry were greatly reduced. In contrast to reflectance values, because the red radiation was much more affected by shadows than the NIR radiation (Leblon et al. 1996, Aparicio et al. 2004) and due to the NDVI formulation, NDVI values were higher in the forward scattering direction at all stages of soybean development. The same behavior was observed for EVI (Figure 3b) and NDWIs. Because of this behavior, the 16-day composite MODIS vegetation index images (product MODIS 13Q1) may be biased in some extent by a preferential pixel selection due to directional rather than atmospheric effects, as discussed by Meyer et al. (1995) when using AVHRR data and the maximum NDVI procedure for pixel selection.

Figure 2

Figure 3

3.2. Directional effects on reflectance and vegetation indices for fixed phenological

stages

For fixed soybean phenological stages in December 2005 (incomplete canopies) and in January 2006 (closed canopies) and for opposite viewing directions, inspection of the scatter plots for MODIS bands (Figure 4) showed higher reflectance for backscattering pixels (close symbols) in concordance with results of Figure 2. Data dispersion was higher in December because of the stronger soil background influence on the incomplete canopy reflectance.

Figure 4

When plotted as a function of the soybean varieties, NDVI showed higher values in the forward scattering direction, which presented also higher amplitude of vegetation index variation with the cultivar development, especially for Monsoy 9010 (Figure 5). This variety was sensed by MODIS in December 2005 at an earlier phenological stage than the others. In agreement with field experiments by Epiphanyo and Huete (1995) and by Walther-Shea et al. (1997), results of Figure 5 showed that directional effects were stronger on NDVI calculated over soybean incomplete canopies (December 2005) than over closed canopies (January 2006), as indicated by larger data variability at initial stages of crop development. The other VIs presented similar results (not showed).

Figure 5

3.3. Sensitivity of vegetation indices to directional effects

Wilcoxon Signed Rank Test coefficients for the differences between vegetation indices calculated at the same soybean phenological stage and in opposite forward scattering (December 21, 2005; +58° view angle) and backscattering (December 22, 2005; -41° view angle) directions showed that NIR-visible based indices (NDVI and EVI) were lesser affected by directional effects. They presented median Z values closer to zero than NDWI₁₆₄₀ and NDWI₂₁₂₀ (Table 4). These two NIR-SWIR indices displayed the largest statistically significant differences when calculated from opposite viewing direction and fixed phenological stages. Results (not shown) for pairs of images in the

2004-2005 growing season were similar to those of Table 4.

Table 4

Angular normalization of the vegetation indices calculated in consecutive days and in opposite viewing directions confirmed the Wilcoxon Signed Rank Test results (Figure 6). NDVI and EVI had average normalized values closer to zero and, thus, these VIs were lesser sensitive to directional effects than $NDWI_{1640}$ and $NDWI_{2120}$. For the four studied vegetation indices, the sensitivity decreased from incomplete (December 21 and 22, 2005) to closed (January 23 and 24, 2006) soybean canopies, which was again in agreement with field experiment results obtained by Epiphonio and Huete (1995) and Walter-Shea et al. (1997). In the 2004-2005 growing season, careful inspection of the angular normalized indices on a per pixel basis showed the predominance of NDVI as the less sensitive index to directional effects for 64% and 88% of the pixels for incomplete (December 6 and 8, 2004) and closed (February 5 and 6, 2005) soybean canopies, respectively (Figure 7a). In the 2005-2006 growing season, NDVI was the less sensitive index for 85% (incomplete canopies; December 21 and 22, 2005) and 74% (closed canopies; January 23 and 24, 2006) of the pixels (Figure 7b). In both cases, EVI displayed the second largest frequency of pixels.

Figure 6

Figure 7

4. CONCLUSION

The temporal variation in MODIS reflectance between consecutive phenological stages was generally smaller than that resultant from viewing geometry. Reflectance differences up to 4% (phenological stage) and up to 20% (viewing geometry) were observed for the soybean cultivar Perdiz in the MODIS NIR band (841-876 nm). The reflectance of the first seven MODIS bands was higher in the backscattering due to the predominance of sunlit canopy components for the MODIS. However, vegetation indices such as NDVI and EVI had larger values in the forward scattering direction

because of stronger shadow effects on the red band. Directional effects were reduced after vegetation index determination but they were still significant. Such effects decreased with canopy closure. NIR-visible based indices (NDVI and EVI) were lesser affected by directional effects than NIR-SWIR indices (NDWI₁₆₄₀ and NDWI₂₁₂₀). NDVI presented the smallest differences between the backscattering and forward scattering directions for fixed phenological stages. Unfortunately, due to the noisy MODIS band 5 (1230-1250 nm), the original NDWI could not be calculated and the directional effects on NIR-NIR indices were not evaluated.

5. ACKNOWLEDGMENTS

The authors are grateful to Grupo André Maggi for providing the agronomical data used in this investigation. Thanks are also due to some Brazilian science foundations: Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) (grant 2008/11499-8), Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), and Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

6. RESUMO

Efeitos direcionais introduzem variabilidade na determinação de índices de vegetação, especialmente quando sensores de amplo campo de visada, como o Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS), são usados. Nesse estudo, nós avaliamos os efeitos direcionais sobre a reflectância e quatro índices de vegetação (NDVI, EVI, NDWI₁₆₄₀ and NDWI₂₁₂₀), calculados a partir de dados MODIS, em função do crescimento da soja em duas estações agrícolas (2004-2005 e 2005-2006). Para manter o estágio reprodutivo de uma dada variedade como um fator constante, variando a geometria de visada, pares de imagens obtidas em datas próximas e com ângulos de visada opostos foram analisadas. Usando uma abordagem estatística não-paramétrica com análise *bootstrapping* associada e normalizando os índices para suas diferenças angulares entre as direções de visada, avaliou-se sua sensibilidade para os efeitos direcionais. Os resultados mostraram que a variação temporal da reflectância do MODIS entre estádios fenológicos consecutivos foi geralmente menor do que aquelas resultantes da geometria de visada. A reflectância das primeiras sete bandas do MODIS

foi maior na direção de retro-espalhamento, mas os índices de vegetação tiveram maiores valores na direção de espalhamento frontal. Os efeitos direcionais diminuíram com o fechamento do dossel. Os índices baseados em bandas do visível e infravermelho próximo (NDVI e EVI) foram menos afetados pelos efeitos direcionais do que aqueles calculados com bandas do infravermelho próximo e de ondas curtas (NDWI₁₆₄₀ and NDWI₂₁₂₀). O NDVI apresentou as menores diferenças entre as direções de retro-espalhamento e espalhamento frontal para um dado estágio fenológico.

Palavras-chave: MODIS, EVI, NDVI, sensoriamento remoto, soja.

7. REFERENCES

- APARICIO N, VILLEGAS D, ROYO C, CASADEUS J AND ARAUS JL. 2004. Effect of sensor view angle on the assessment of agronomic traits by ground level hyper-spectral reflectance measurements in durum wheat under contrasting Mediterranean conditions. *Int J Remote Sens* 25: 1131-1152.
- CHEN D, HUANG J, JACKSON TJ. 2005 Vegetation water content estimation for corn and soybeans using spectral indices derived from MODIS near- and short-wave infrared bands. *Remote Sens Environ* 98: 225-236.
- DORAISWAMY PC, SINCLAIR TR, HOLLINGER S, AKHMEDOV B, STERN A AND PRUEGER J. 2005. Application of MODIS derived parameters for regional crop yield assessment. *Remote Sens Environ* 97: 192-202.
- DWYER J AND SCHMIDT G. 2006. The MODIS reprojection tool. In: Qu JJ ET AL. (Eds), *Earth Science Satellite Remote Sensing*, Berlin: Springer, Berlin, Germany, p. 162-177.
- EPIPHANIO JCN AND HUETE AR. 1995. Dependence of NDVI and SAVI on sun/sensor geometry and its effect on fAPAR relationships in Alfalfa. *Remote Sens Environ* 51: 351-360.
- GALVÃO LS, ROBERTS DA, FORMAGGIO AR, NUMATA I, BREUNIG FM. 2009. View angle effects on the discrimination of soybean varieties and on the relationships between vegetation indices and yield using off-nadir Hyperion data. *Remote Sens Environ* 113: 846-856.
- GAO B. 1996. NDWI - A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote Sens Environ* 58: 257-266.
- GAO X, HUETE A, AND DIDAN K. 2003. Multisensor comparisons and validation of MODIS vegetation indices at the semiarid Jornada experimental range. *IEEE Trans Geosci Remote Sens* 41: 2368-2381.
- HUETE AR, DIDAN K, MIURA T, RODRIGUEZ EP, GAO X AND FERREIRA LG. 2002. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS

vegetation indices. *Remote Sens Environ* 83: 195-213.

JACKSON TJ, CHEN D, COSH M, LI F, ANDERSON, M, WALTHALL C, DORIASWAMY P, RAY HUNT E. 2004. Vegetation water content mapping using Landsat data derived Normalized Difference Water Index for corn and soybeans. *Remote Sens Environ* 92: 475-482.

JIANG Z, HUETE A, DIDAN K, AND MIURA T. 2008. Development of a two-band Enhanced Vegetation Index without a blue band. *Remote Sens Environ* 112: 3833-3845.

JIANG B, LIANG S, WANG J AND XIAO Z. 2010. Modeling MODIS LAI time series using three statistical methods. *Remote Sens Environ* 114: 1432-1444.

KNYAZIKHIN Y, MARTONCHIK JV, MYNENI RB, DINER DJ, RUNNING SW. 1998. Synergistic algorithm for estimating vegetation canopy leaf area index and fraction of absorbed photosynthetically active radiation from MODIS and MISR data. *J Geophys Res* 103: 32257-32276.

LEBLON B, GALLANT L, GRANBERG H. 1996. Effects of shadowing types on ground-measured visible and near-infrared shadow reflectances. *Remote Sens Environ* 58: 322-328.

MEYER D, VERSTRAETE M, PINTY B. 1995. The effect of surface anisotropy and viewing geometry on the estimation of NDVI from AVHRR. *Remote Sens Rev* 12: 3-27.

MIURA T, HUETE AR, AND YOSHIOKA H. 2000. Evaluation of sensor calibration uncertainties on vegetation indices for MODIS. *IEEE Trans Geosci Remote Sens* 38: 1399-1409.

MYNENI RB, WILLIAMS DL. 1994. On the relationship between FAPAR and NDVI. *Remote Sens Environ* 49: 200-211.

MYNENI RB, HOFFMAN S, KNYAZIKHIN Y, PRIVETTE JL, GLASSY J, TIAN Y, WANG Y, SONG X, ZHANG Y, SMITH GR, LOTSCH A, FRIEDL M, MORISETTE TJ, VOTAVA P, NEMANI RR, RUNNING SW. 2002. Global products of vegetation leaf area and fraction absorbed PAR from year one of MODIS data. *Remote Sens Environ* 83: 214-231.

RIZZI R AND RUDORFF BFT. 2007. MODIS sensor images associated with an agronomic model to estimate soybean grain yield. *Pesq Agropec Bras* 42: 73-80.

RIZZI R, RUDORFF BFT, SHIMABUKURO YE AND DORIASWAMY PC. 2006. Assessment of MODIS LAI retrievals over soybean crop in Southern Brazil. *Int J Remote Sens* 27: 4091-4100.

ROUSE JW, HAAS RH, SCHELL JA AND DEERING DW. 1973. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. In: *Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium, 3, Washington- DC Proceedings...., Washington- DC: STANLEY C, ET AL., p. 309-317.*

WALTER-SHEA EA, PRIVETTE J, CORNELL D, MESARCH MA AND HAYS CJ. 1997. Relations between directional spectral vegetation indices and leaf area and

absorbed radiation in Alfalfa. Remote Sens Environ 6: 162-177.

WARDLEY NW. 1984. Vegetation index variability as a function of viewing geometry. Int J Remote Sens 5: 861-870.

WILCOXON F. 1945. Individual Comparisons by Ranking Methods. Biometrics Bull 1: 80-83.

XIONG X, CHE NZ, BARNES W. 2005. Terra MODIS on-orbit spatial characterization and performance. IEEE Trans Geosci Remote Sens 43: 355-365.

YI Y, YANG D, HUANG J AND CHEN D. 2008. Evaluation of MODIS surface reflectance products for wheat leaf area index (LAI) retrieval. ISPRS J Photogramm Remote Sens 63: 661-677.

LIST OF TABLES

Table 1 – Agronomic data for some soybean cultivars planted at the Tanguro farm in the 2004-2005 and 2005-2006 growing seasons.

Cultivar	2004-2005			2005-2006		
	Planting date MM/DD,YY	Harvest date MM/DD,YY	<i>n</i>	Planting date MM/DD,YY	Harvest date MM/DD,YY	<i>n</i>
Perdiz	10/30-11/09, 2004	03/07-04/09, 2005	47	10/25-11/05, 2005	03/01-03/ 28, 2005	30
Monsoy 9010	11/14-11/16, 2004	03/24-03/30, 2005	15	11/11-11/13, 2005	03/02-04/08, 2006	12
Tabarana	-	-	-	11/08-11/14, 2005	03/20-04/09, 2006	13
Monsoy 8914	-	-	-	11/02-11/17, 2005	03/09-03/20, 2006	17
Monsoy 8411	10/29-11/01, 2004	02/21-03/13, 2005	8	-	-	-

n is the number of soybean fields sensed by MODIS for each cultivar.

Table 2 – List of MODIS images used in the analysis of the 2005-2006 soybean growing season.

Date	View Angle (°)	Direction	Days planting* after
November 04, 2005	- 41	Backscattering	<i>Planting period</i>
November 06, 2005	- 56	Backscattering	<i>Planting period</i>
November 07, 2005	+24	Forward scattering	<i>Planting period</i>
November 09, 2005	- 4	Backscattering	<i>Planting period</i>
November 21, 2005	+45	Forward scattering	12
December 21, 2005	+58	Forward scattering	42
December 22, 2005	- 41	Backscattering	43

December 25, 2005	+24	Forward scattering	46
January 14, 2006	- 32	Backscattering	66
January 19, 2006	+8	Forward scattering	71
January 21, 2006	- 20	Backscattering	73
January 22, 2006	+58	Forward scattering	74
January 23, 2006	- 42	Backscattering	75
January 24, 2006	+44	Forward scattering	76
January 25, 2006	- 57	Backscattering	77
January 29, 2006	+63	Forward scattering	81
February 09, 2006	+44	Forward scattering	92
February 19, 2006	- 62	Backscattering	102
February 22, 2006	- 19	Backscattering	105
March 21, 2006	- 50	Backscattering	<i>Harvest period</i>

* November 9 served as reference for planting date.

Table 3 – First seven MODIS bands and derived vegetation indices under analysis.

Vegetation Index	Formula	Reference	First seven MODIS Bands
NDVI	$(b2 - b1)/(b2 + b1)$	Rouse et al. (1973)	b1 (620-670 nm)
EVI	$2.5 \left(\frac{(b2 - b1)}{(b2 + 6 * b1 - 7.5 * b3 + 1)} \right)$	Huete et al. (2002)	b2 (841-876 nm)
NDWI ₁₆₄₀	$(b2 - b6)/(b2 + b6)$	Chen et al. (2005)	b3 (459-479 nm)
NDWI ₂₁₂₀	$(b2 - b7)/(b2 + b7)$	Chen et al. (2005)	b4 (545-565 nm)
			b5 (1230-1250 nm)
			b6 (1628-1652 nm)
			b7 (2105-2155 nm)

Table 4 – Wilcoxon Signed Rank Test coefficients for the differences between vegetation indices calculated at the same soybean phenological stages and with opposite viewing geometries in the forward scattering (December 21, 2005; +58° view angle) and backscattering (December 22, 2005; -41° view angle) directions.

Forward Scattering versus backscattering	n	Wilcoxon Signed Ranks Test results*						
		Min. Z	Median Z	Max. Z	Z S.D.	Median p	Mean p	p S.D.
NDVI	72	-6.460	-4.319	-1.094	0.737	<0.000	0.001	0.010
EVI	72	-6.830	-5.357	-2.879	0.636	< 0.000	< 0.000	< 0.000
NDWI ₁₆₄₀	72	-7.376	-6.847	-5.511	0.333	< 0.000	< 0.000	< 0.000
NDWI ₂₁₂₀	72	-7.376	-7.333	-7.066	0.057	< 0.000	< 0.000	< 0.000

* After bootstrapping resampling with 1000 interactions.

LIST OF FIGURES

Figure 1 – Mean MODIS reflectance spectra of the Perdiz soybean cultivar in two development stages of the 2005-2006 growing season.

Figure 2 – Variation in reflectance as a function of the crop development (Perdiz cultivar) and viewing direction for the MODIS (a) red (620-670 nm) and (b) near-infrared (NIR) (841-876 nm) bands.

Figure 3 – Variation in (a) NDVI and (b) EVI as a function of the crop development (Perdiz cultivar) and viewing direction.

Figure 4 – Relationship between the MODIS red (620-670 nm) and near-infrared (NIR) (841-876 nm) reflectance for two pairs of images acquired in opposite viewing directions at incomplete (December 21 and 22, 2005) and closed (January 23 and 24, 2006) soybean canopies. Open and close symbols indicate the forward scattering and backscattering view directions, respectively.

Figure 5 – NDVI variation for different soybean varieties for two pairs of images acquired in opposite viewing directions at incomplete (December 21 and 22, 2005; open symbols) and closed (January 23 and 24, 2006; close symbols) soybean canopies.

Figure 6 – Angular normalization (average values) of the four studied vegetation indices calculated in consecutive days and in opposite viewing directions at incomplete (December 21 and 22, 2005) and closed (January 23 and 24, 2006) soybean canopies.

Figure 7 – Frequency of the pixels with the lowest sensible vegetation indices (angular differences) to directional effects for incomplete (December) and closed (January-February) soybean canopies in the (a) 2004-2005 and (b) 2005-2006 growing seasons.

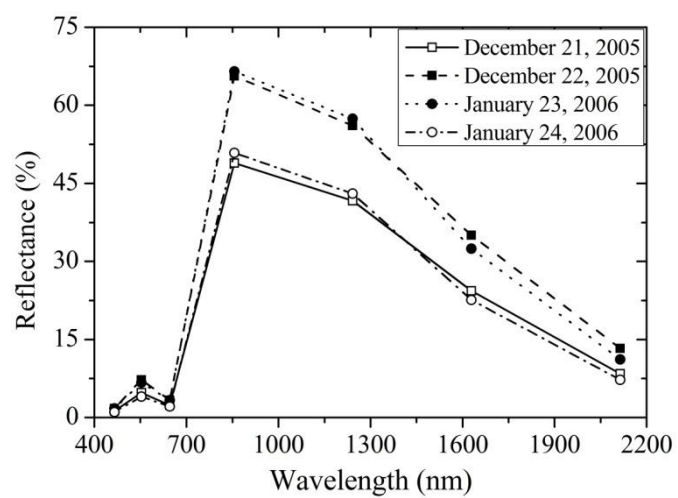


Figure 1

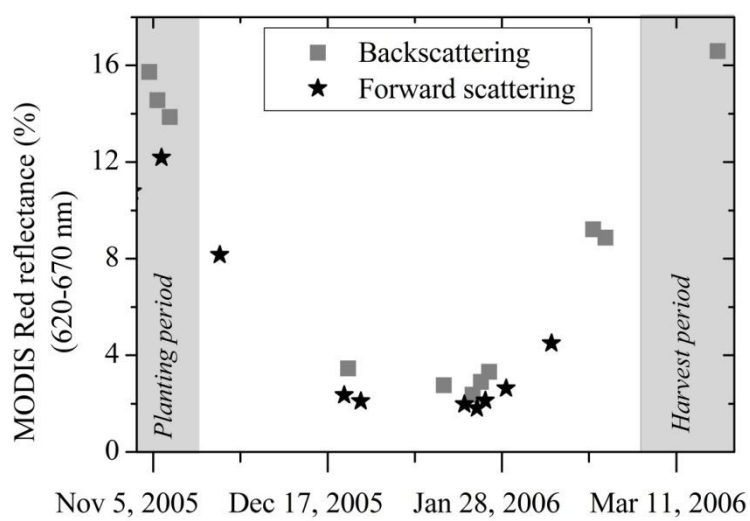


Figure 2a

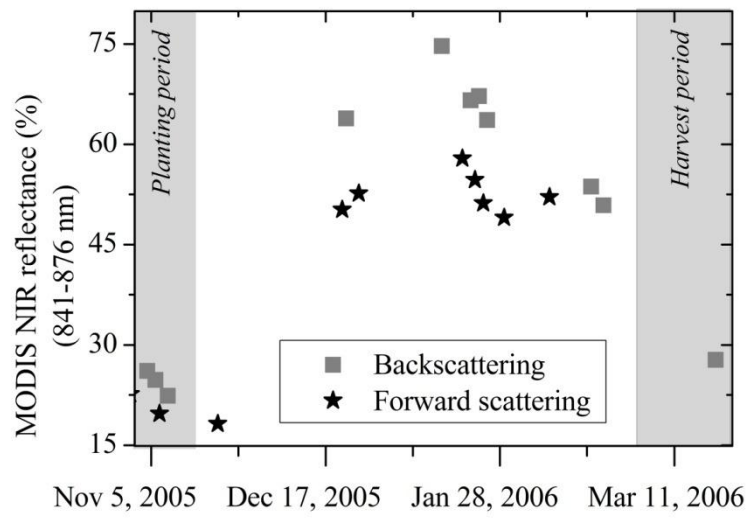


Figure 2b

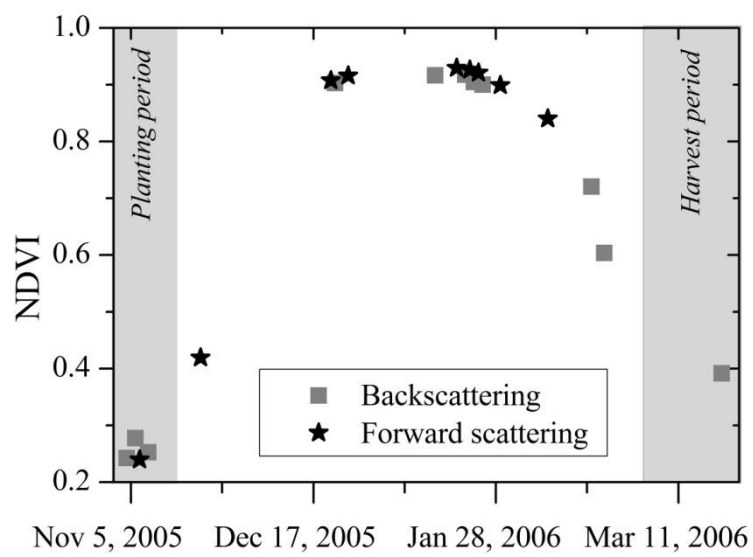


Figure 3a

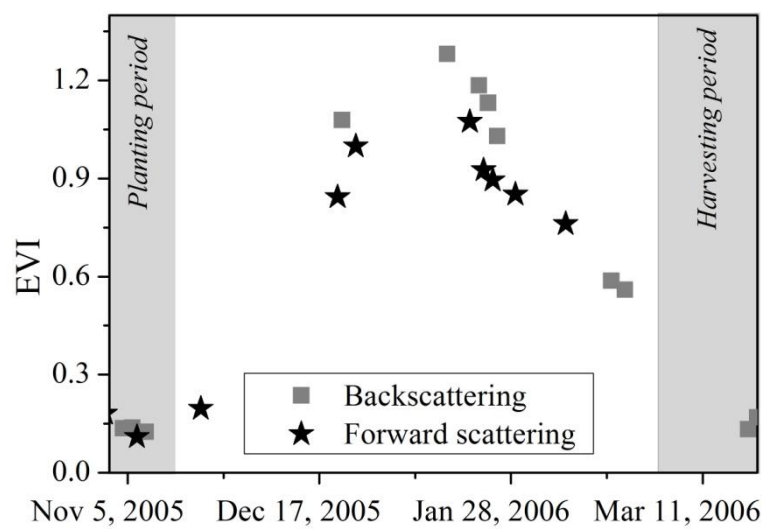


Figure 3b

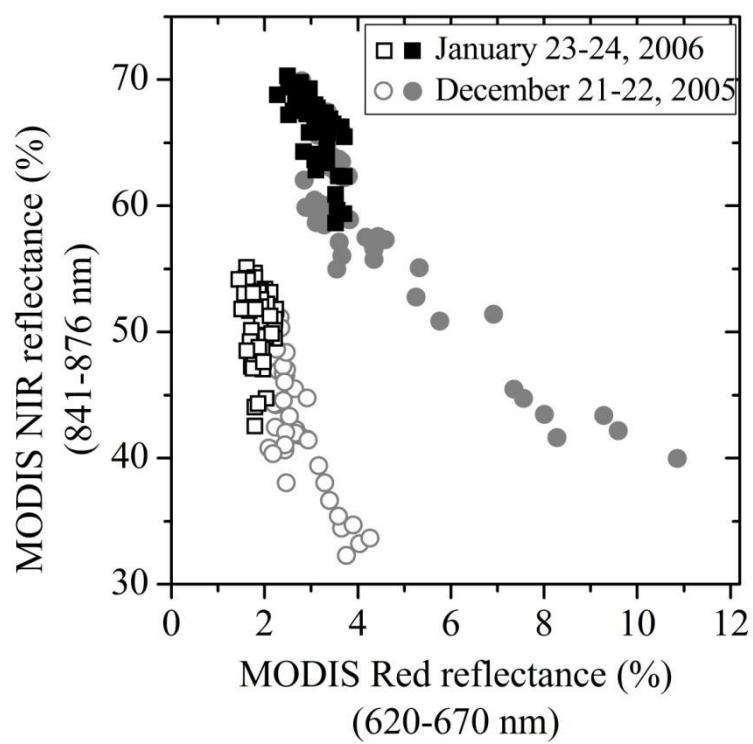


Figure 4

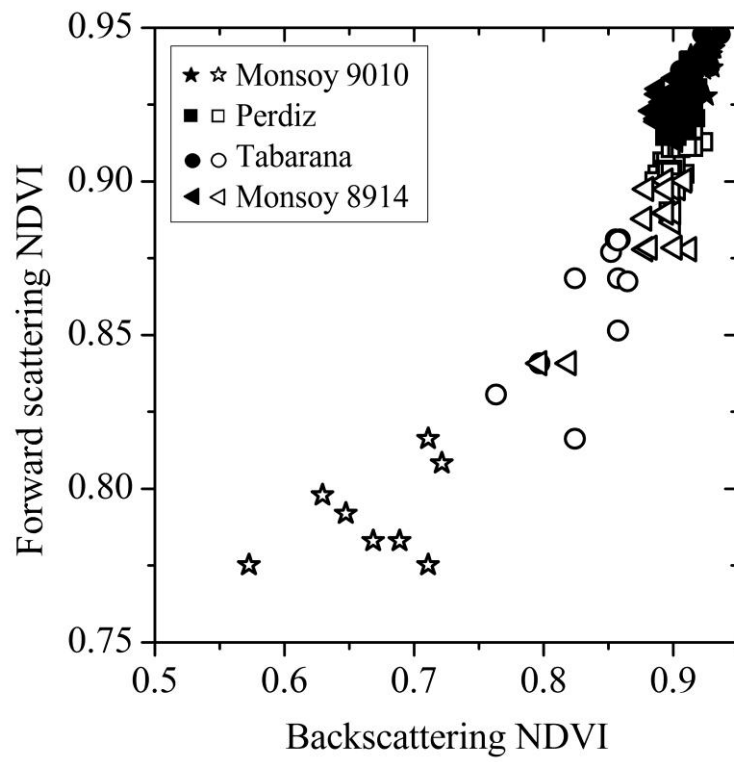


Figure 5

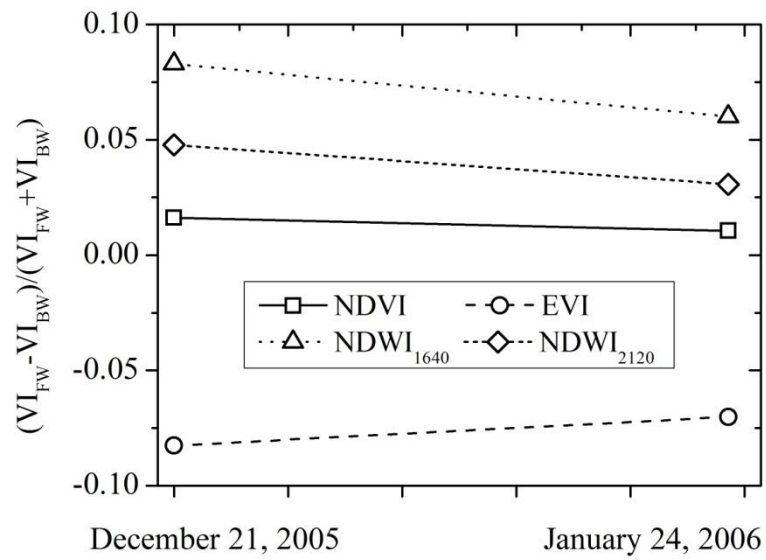


Figure 6

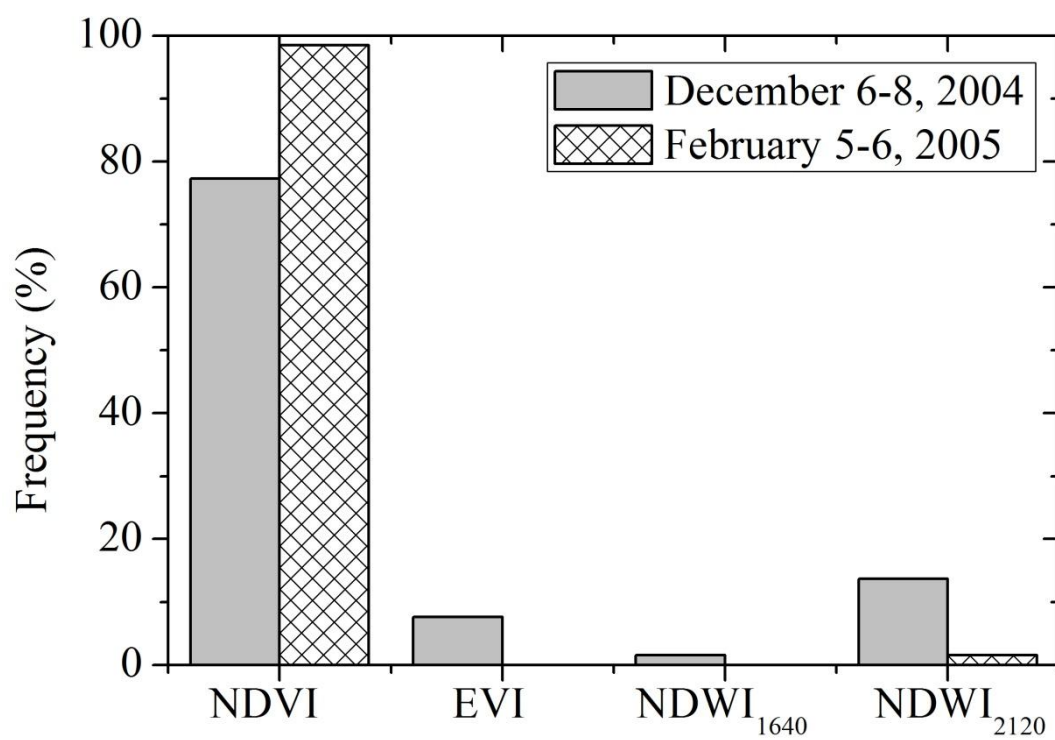


Figure 7a

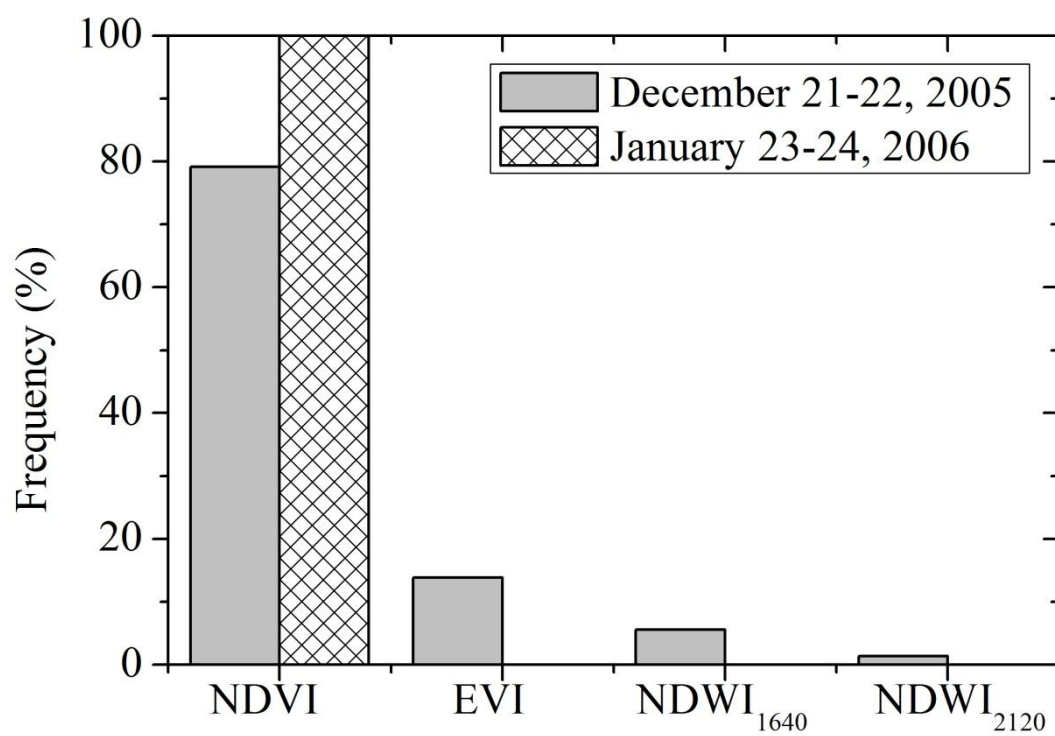


Figure 7b

ANEXO A – Artigo publicado como coautor na revista “Remote Sensing of Environment”.

Remote Sensing of Environment 113 (2009) 846–856



Contents lists available at ScienceDirect

Remote Sensing of Environment

journal homepage: www.elsevier.com/locate/rse



View angle effects on the discrimination of soybean varieties and on the relationships between vegetation indices and yield using off-nadir Hyperion data

Lênio Soares Galvão^{a,*}, Dar A. Roberts^b, Antônio Roberto Formaggio^a, Izaya Numata^c, Fábio Marcelo Breunig^a

^a Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), Divisão de Sensoriamento Remoto, Caixa Postal 515, 12245-970, São José dos Campos, SP, Brazil

^b University of California, Geography Department, Santa Barbara, CA, 93106-4060, USA

^c South Dakota State University, GISCE, Brookings, SD, 57007, USA

ARTICLE INFO

Article history:

Received 24 June 2008

Received in revised form 23 December 2008

Accepted 24 December 2008

Keywords:

Hyperspectral remote sensing

Hyperion

Soybean

Yield

MODIS

View angle

Vegetation indices

ABSTRACT

Imaging spectrometry has the potential to provide improved discrimination of crop types and better estimates of crop yield. Here we investigate the potential of Hyperion to discriminate three Brazilian soybean varieties and to evaluate the relationship between grain yield and 17 narrow-band vegetation indices. Hyperion analysis focused on two datasets acquired from opposite off-nadir viewing directions but similar solar geometry: one acquired on 08 February 2005 (forward scattering) and the other on 14 January 2006 (back scattering). In 2005, the soybean canopies were observed by Hyperion at later reproductive stages than in 2006. Additional Hyperion datasets were not available due to cloud cover. To further examine the impact of viewing geometry within the same season, Hyperion data were complemented by 250 m Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) images (bands 1 and 2) acquired in consecutive days (05–06 February 2005) with opposite viewing geometries (-42° and $+44^\circ$, respectively). MODIS data analysis was used to keep reproductive stage as a constant factor while isolating the impact of viewing geometry. For discrimination purposes, multiple discriminant analysis (MDA) was applied over each dataset using surface reflectance values as input variables and a stepwise procedure for band selection. All possible Hyperion band ratios and the 17 narrow-band vegetation indices with soybean grain yield were evaluated across years through Pearson's correlation coefficients and linear regression. MODIS-derived Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) and Simple Ratio (SR) were evaluated within the same growing season. Results showed that: (1) the three soybean varieties were discriminated with highest accuracy in the back scattering direction, as deduced from MDA classification results from Hyperion and MODIS data; (2) the highest correlation between Hyperion vegetation indices and soybean yield was observed for the Normalized Difference Water Index (NDWI) ($r=+0.74$) in the back scattering direction and this result was consistent with band ratio analysis; (3) higher Hyperion correlation results were observed in the back scattering direction when compared to the forward scattering image. For the same reproductive stage, stronger shadowing effects were observed over the MODIS red band in the forward scattering direction producing lower and lesser variable reflectance for the sensor. As a result, the relationship between MODIS-derived NDVI and soybean yield improved from the forward (r of +0.21) to the back scattering view (r of +0.60). The same trend was observed for SR that increased from +0.22 to +0.58.

© 2008 Elsevier Inc. All rights reserved.

1. Introduction

Crop yield prediction can impact economic strategic planning, food management and pricing. Most often, vegetation indices have been used to either establish empirical relationships with crop yield at local scales (e.g., Ma et al., 2001; Serrano et al., 2000; Shanahan et al., 2001; Shibayama & Akiyama, 1991; Royo et al., 2003) or to estimate a biophysical attribute, such as Leaf Area Index (LAI) for use in crop growth

and yield models (Bauer et al., 1986; Clevers, 1997; Doraiswamy et al., 2004; Prasad et al., 2006; Rizzi & Rudorff, 2007). Successive measurements of vegetation indices during the growing season or between multiple dates have also been proposed as an alternative for yield prediction (Aparicio et al., 2000; Chang et al., 2003; Li et al., 2007; Liu & Kogan, 2002; Rudorff & Batista, 1990; Wiegand et al., 1991). At local scales, yield is also dependent on crop varieties (Pfeiffer, 1996), which have been continuously developed and tested to provide higher yields through adaptation to local climates and soils, and/or through greater tolerance to herbicides, pests and diseases.

While Brazil has experienced an impressive rise in soybean production in the last few decades, few remote sensing studies have focused on

* Corresponding author.

E-mail address: lenio@dsr.inpe.br (L.S. Galvão).

Table 1
Soybean development in the 2004–2005 growing season

Soybean variety	Planting period (2004)	Row spacing (m)	Harvest period (2005)	Average yield and standard deviation (kg/ha)	Average local cycle (Days)	Canopy closure (%) ^a	Reproductive stage ^b	LAI ^a	Planting fields
Monsoy 9010	14 to 17 November	0.45	24 March to 1 April	3088±474	133	100	R4 to R5	2.0 to 2.5	12
Perdiz	30 October to 8 November	0.45	12 to 31 March	2918±462	139	100	R5 to R6	2.5 to 3.0	26
Tabarana	10 to 13 November	0.45	31 March to 10 April	2906±550	142	100	R5	3.0 to 3.5	12

Canopy closure, reproductive stages and leaf area index (LAI) values refer to the date of Hyperion imagery (Feb/08/2005_Foward; 85 to 95 days after planting).

^a Estimated for 320,000 plants/ha and for the day of image acquisition based on the work by Heffig et al. (2006).

^b R4 means full pod. R5 and R6 are equivalent to beginning and full seed, respectively (Fehr and Caviness, 1977).

soybeans. Furthermore, the few studies that have occurred have used vegetation indices derived from broadband imaging systems or from laboratory/field spectrometers. In fact, when compared to other crops, the relationship between remote sensing data and soybean yield is weak (Ma et al., 2001). On the other hand, recent advances in orbital hyperspectral remote sensing offer the potential of significantly improving our ability to discriminate soybean varieties and developing improved relationships for soybean yield using narrow-band vegetation indices (Thenkabail et al., 2000; Xavier et al., 2006; Zarco-Tejada et al., 2005).

Hyperion, on board the Earth Observing-1 (EO-1) spacecraft, launched in November 2000, is a pushbroom hyperspectral instrument capable of acquiring images with 196 calibrated bands (10 nm of bandwidth) in the visible (VIS), near infrared (NIR) and shortwave infrared (SWIR) (400–2400 nm range) with a spatial resolution of 30 m and a swath width of 7.7 km (Pearlman et al., 2003). The sensor enables the calculation of several narrow-band vegetation indices associated with biochemical and biophysical crop variables (e.g., chlorophyll, leaf water content, lignin, cellulose, LAI) that can be related potentially to crop yield. The 16 day revisit time of the sensor can be reduced by cross-track pointing. Thus, depending on the pointing angle, Hyperion/EO-1 may work as an off-nadir sensor, but this characteristic has not been exploited in many applications. As pointed out by Aparicio et al. (2004) in a field reflectance experiment, the performance of vegetation indices to predict wheat yield varies with sensor view angle. Furthermore, off-nadir measurements were also more closely related to photosynthetic efficiency than nadir measurements over an irrigated rice field (Inoue et al., 2008). Significant changes in the reflectance of soybean canopies with view-illumination geometry were described by Kollenkark et al. (1982) and Ranson et al. (1985). Thus, based on these investigations, we can hypothesize that viewing geometry will affect soybean variety discrimination and the relationships between vegetation indices and grain yield.

In this study, we investigated the ability of Hyperion to discriminate three Brazilian soybean varieties and evaluated the relationship between grain yield and 17 narrow-band vegetation indices, calculated from opposite off-nadir viewing directions (forward and back scattering) but with similar solar geometry. Two dates were examined: one on 08 February 2005 and the other on 14 January 2006. Due to severe cloud cover and the unavailability of more Hyperion images to sample the same reproductive stage in different viewing geometries, a pair of Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS)/Terra images, acquired in consecutive days (05–06 February 2005) and in opposite view angles (−42° and +44°, respectively), was used to complement Hyperion data analysis.

Specific questions addressed in this study were: (1) Does view angle affect the discrimination of the soybean varieties? (2) Are there statistically significant relationships between soybean yield and specific Hyperion vegetation indices? (3) Are the relationships affected by viewing geometry?

2. Methodology

2.1. Off-nadir image acquisition and pre-processing

The study area is located at *Fazenda Tanguro*, a farm in Queriência municipality, Mato Grosso state, Brazil, between 12°41'54"S/52°24'59"W and 12°52'28"S/52°19'09"W. It comprises the transition zone between the Brazilian savannas (*Cerrado*) and the Amazonian tropical rain forest. The topography of the region (350 m of altitude) is flat with the predominance of dystrophic Red-Yellow Latosol (Typic Acrustox in the Soil Taxonomy) (Corrêa, 2002). The climate is subtropical with a mean temperature of 26 °C. The annual rainfall reaches up to 1850 mm with a well-defined rainy season between October and April.

Hyperion/EO-1 acquired images on two dates with opposite view directions: 08 February 2005 (2004–2005 growing season; forward scattering direction; predominance of shaded canopy components viewed by the sensor; henceforth named Feb/08/2005_Foward) and 14 January 2006 (2005–2006 growing season; back scattering direction; dominance of sensed sunlit canopy components; henceforth named Jan/14/2006_Back). The pointing angles were +21° and −26°, respectively. Solar elevation (58.7° and 53.8°) and azimuth (96.9° and 108.3°) angles presented small differences between the dates. The images were obtained in 242 contiguous bands, sampled at approximately 10-nm intervals in the 356–2577 nm range with a nominal cross-track swath width of 7.65 km. However, only 196 bands were radiometrically calibrated between 426 and 2395 nm and effectively used in this study. The sensor has a nominal ground instantaneous field of view (GIFOV) of 30 m (Pearlman et al., 2003).

An algorithm to identify bad pixels and to reduce striping effects was applied over the Hyperion images replacing abnormal vertical lines by the average response of adjacent columns (Goodenough et al., 2003). The Hyperion radiance values from the 196 bands were converted into surface reflectance images using the Fast Line-of-Sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes (FLAASH) algorithm, a MODTRAN4-based approach to remove scattering and absorption effects of the atmosphere constituents for nadir and non-nadir viewing instruments (Felde et al., 2003). A correction for adjacency effects was applied using this algorithm. Model

Table 2
Soybean development in the 2005–2006 growing season

Soybean variety	Planting period (2005)	Row spacing (m)	Harvest period (2006)	Average yield and standard deviation (kg/ha)	Average local cycle (Days)	Canopy closure (%) ^a	Reproductive stage ^b	LAI ^a	Planting fields
Monsoy 9010	11 to 17 November	0.45	24 March to 9 April	3723±237	139	90	R1	1.0 to 1.5	11
Perdiz	25 October to 5 November	0.45	1 to 28 March	3405±353	130	100	R2 to R3	2.0 to 2.5	13
Tabarana	8 to 18 November	0.45	20 March to 9 April	4069±455	134	95	R1 to R2	1.5 to 2.0	21

Canopy closure, reproductive stages and leaf area index (LAI) values refer to the date of Hyperion imagery (Jan/14/2006_Back; 62 to 81 days after planting).

^a Estimated for 320,000 plants/ha and for the day of image acquisition based on the work by Heffig et al. (2006).

^b R1 and R2 represent beginning and full bloom, respectively. R3 means beginning pod (Fehr and Caviness, 1977).

Table 3
Hyperion-derived vegetation indices used in the study

Vegetation Index	Formula ^a	Reference
ARVI	$(\rho_{864} - (2 * \rho_{671} - \rho_{467})) / (\rho_{864} + (2 * \rho_{671} - \rho_{467}))$	Kaufman and Tanré (1992)
EVI	$2.5 * ((\rho_{864} - \rho_{671}) / (\rho_{864} + 6 * \rho_{671} - 7.5 * \rho_{467} + 1))$	Huete et al. (2002)
NDVI	$(\rho_{864} - \rho_{671}) / (\rho_{864} + \rho_{671})$	Rouse et al. (1973)
SR	ρ_{864} / ρ_{671}	Rouse et al. (1973)
MSI	ρ_{1598} / ρ_{823}	Hunt and Rock (1989)
NDII	$(\rho_{823} - \rho_{1649}) / (\rho_{823} + \rho_{1649})$	Hunt and Rock (1989)
NDWI	$(\rho_{854} - \rho_{1245}) / (\rho_{854} + \rho_{1245})$	Gao (1996)
WBI	ρ_{905} / ρ_{973}	Penuelas et al. (1997)
PSRI	$(\rho_{681} - \rho_{498}) / \rho_{752}$	Merzlyak et al. (1999)
CRI	$(1 / \rho_{508}) - (1 / \rho_{701})$	Gitelson, Kaufman, Stark, & Rundquist (2002)
PRI	$(\rho_{529} - \rho_{569}) / (\rho_{529} + \rho_{569})$	Gamon et al. (1997)
SIPI	$(\rho_{803} - \rho_{467}) / (\rho_{803} + \rho_{681})$	Penuelas et al. (1995)
RENDVI	$(\rho_{752} - \rho_{701}) / (\rho_{752} + \rho_{701})$	Gitelson et al. (1996)
REP	$(\rho_n + 1 - \rho_m) / 10$ in the 690–750 nm interval	Curran et al. (1995)
VOG1	ρ_{742} / ρ_{722}	Vogelmann et al. (1993)
VARI	$(\rho_{559} - \rho_{640}) / (\rho_{559} + \rho_{640} - \rho_{467})$	Gitelson, Zur, Chivkunova, & Merzlyak (2002)
Vlg	$(\rho_{559} - \rho_{640}) / (\rho_{559} + \rho_{640})$	Gitelson, Zur, Chivkunova, & Merzlyak (2002)

Index abbreviations are defined in the text.
^a ρ is the reflectance of the closest Hyperion bands (n , centre in nanometers) to the original wavelength formulations.

parameters included a tropical atmosphere and a rural aerosol model. Hyperion bands covering the 1140-nm water vapor band were used to

estimate precipitable water vapor on a per-pixel basis. To remove artifacts from atmospheric correction and to smooth data, inverse minimum noise fraction (MNF) transformations (Green et al., 1988) were applied to each FLAASH-derived surface reflectance image at selected spectral intervals. The images were then geo-referenced (nearest-neighbor resampling).

Severe cloud cover precluded the use of additional Hyperion images from the same reproductive stage in opposite viewing geometries. To keep soybean reproductive stage as a constant factor and change view angle, a pair of off-nadir MODIS images acquired in 2005 in a close date as Hyperion (05–06 February 2005 for MODIS versus 08 February 2005 for Hyperion) was selected. Surface reflectance values (MOD09GQ product) of the red (620–670 nm) and near infrared (841–876 nm) bands with 250 m of spatial resolution were acquired in the forward (henceforth named MODIS_Feb/06/2005_Forward) and back (MODIS_Feb/05/2005_Back) scattering directions with view angles of +44° and –42°, respectively. The solar azimuth and elevation angles were 98° and 63°, respectively. Use of MODIS data at 500 m of spatial resolution was not possible due to the comparatively small size of the soybean fields in the farm and the associated spectral mixture effects on data analysis. The MODIS Reprojection Tool (MRT) (Dwyer & Schmidt, 2006) was used to convert the sinusoidal projection into planar coordinates (WGS-84).

2.2. Soybean variety development in the 2004–2005 and 2005–2006 growing seasons

Seven soybean varieties were planted (11,000 ha) at the Tanguro farm in the 2004–2005 and 2005–2006 growing seasons. From this

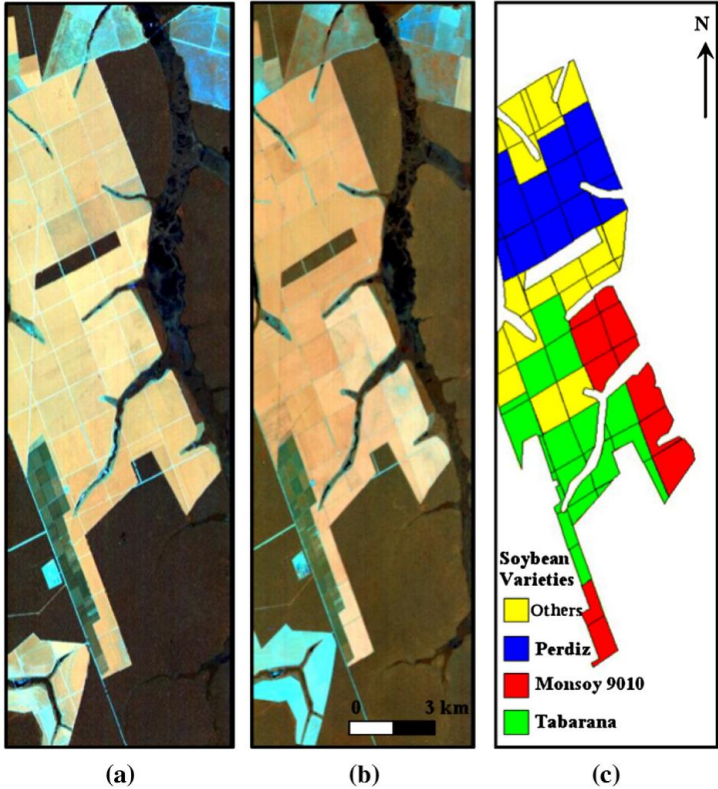


Fig. 1. False color composites with the Hyperion bands at 864 nm (red), 1659 nm (green) and 2203 nm (blue) from off-nadir viewing in the (a) forward (Feb/08/2005_Forward) and (b) back (Jan/14/2006_Back) scattering directions. (c) Planted soybean variety fields at the Tanguro farm in 2006.

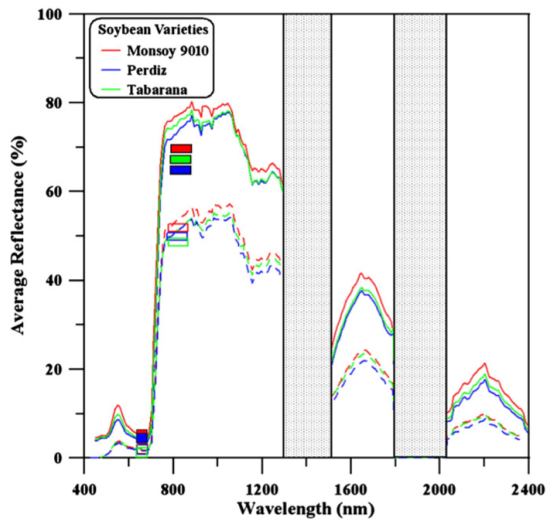


Fig. 2. Average Hyperion reflectance spectra of the three soybean varieties in the forward (dashed lines; Feb/08/2005) and back (solid lines; Jan/14/2006) scattering directions. Open and close bars indicate the red and near infrared MODIS reflectance for the same reproductive stage in the forward (Feb/06/2005) and back (Feb/05/2005) scattering directions, respectively.

set of varieties, only three (Monsoy 9010, Perdiz and Tabarana) were planted in both seasons and occupied large enough areas of the farm. The major agronomic characteristics of these three varieties are presented in Tables 1 and 2 for each growing season, respectively. From the 2004–2005 to the 2005–2006 period, there was an increase in average soybean yield for all varieties. Several planted fields of Perdiz were replaced by the Tabarana variety, which increased the number of Tabarana fields from 12 (Table 1) to 21 (Table 2). The total number of fields ranged from 50 (Table 1) to 45 (Table 2).

During the Hyperion image acquisition in the first growing season (Feb/08/2005_Foward; 85 to 95 days after planting), reproductive stages ranged from R4 (full pod) to R6 (full seed) (Fehr & Caviness, 1977) and there was no exposed soil (100% of canopy closure; Table 1). In the second growing season (Jan/14/2006_Back; 62 to 81 days after planting), the three soybean varieties were observed at earlier reproductive stages (R1 to R3; beginning bloom to beginning pod) and with lower LAI values than in the first date. Exposed soil was minimal, as indicated by canopy closure values close to 100% (Table 2). Row spacing was constant between the two seasons (0.45 m).

Table 4
MDA classification results for a separate set of 6606 pixels of the Hyperion Feb/08/2005_Foward scattering image

Soybean variety	Monsoy 9010	Perdiz	Tabarana	Total (pixels)	Producer's accuracy (%)	Selected Hyperion bands (nm)
Monsoy 9010	1265	375	1	1641	89.0	620, 691, 701, 712, 752, 1104, 1124, 1286, 1659, 1679 and 2203
Perdiz	145	3995	9	4149	91.0	
Tabarana	11	21	784	816	98.7	
Total (pixels)	1421	4391	794	6606		
User's accuracy (%)	77.1	96.3	96.1			
Overall accuracy (%)	91.5					

The selected Hyperion bands from the stepwise procedure are indicated.

Table 5
MDA classification results for a separate set of 6897 pixels of the Hyperion Jan/14/2006_Back scattering image

Soybean variety	Monsoy 9010	Perdiz	Tabarana	Total (pixels)	Producer's accuracy (%)	Selected Hyperion Bands (nm)
Monsoy 9010	1623	3	78	1704	98.1	487, 508, 528, 548, 569, 599, 620, 640, 671, 691, 721, 742, 762, 823, 874, 1073, 1255, 1548, 1568, 1598, 1618, 1648, 2264 and 2304.
Perdiz	19	2460	13	2492	97.3	
Tabarana	12	65	2624	2701	96.6	
Total (pixels)	1654	2528	2715	6897		
User's accuracy (%)	95.2	98.7	97.1			
Overall accuracy (%)	97.2					

The selected Hyperion bands from the stepwise procedure are indicated.

2.3. Data analysis

Maps of soybean variety for both growing seasons and grain yield were provided by the farm. Yields were derived from machine harvest from specific fields that were easy to locate in the imagery.

To evaluate differences in spectral reflectance between the three soybean varieties (Monsoy 9010, Perdiz and Tabarana) as it varied with viewing geometry, multiple discriminant analysis (MDA) was applied to each Hyperion dataset (Feb/08/2005_Foward and Jan/14/2006_Back) using surface reflectance values as input variables. This approach was used by Apan et al. (2004) and Galvão et al. (2005) to detect sugarcane disease and to discriminate sugarcane varieties with Hyperion data, respectively. Hyperion bands centered at 1400 nm and 1900 nm were excluded from the analysis due to the strong water vapor atmospheric absorption. MDA performs linear discriminant analysis for multiple groups with the final objective of classifying samples into one of the groups. This technique was selected in this study to deal simultaneously with three important needs: maximal separability between soybean varieties, feature selection to avoid the Hughes effect, and classification. The Kolmogorov–Smirnov test was used to evaluate data normality. A stepwise procedure was applied to select the best bands to discriminate the three soybean varieties and to maximize the Mahalanobis distance between the two more similar cultivars. The probability of F was used as a criterion to include (0.05) and to remove (0.10) variables. The set of pixels (approximately 15,500 pixels per date) representing the three varieties was randomly divided into two groups: 65% for training and 35% to assess the accuracy of the discrimination functions. Classification results from MDA were then compared between the varieties and between the forward and back scattering Hyperion images. Because Hyperion MDA results might be influenced across years by both the viewing geometry and the differences in soybean reproductive stages, MDA was also applied to MODIS data acquired in consecutive days and opposite view directions (MODIS_Feb/05/2005_Back and MODIS_Feb/06/2005_Foward) to maintain reproductive stage as a constant factor. Surface reflectance values of bands 1 and 2 were used as input variables for MDA and a total of 398 pixels per image were selected for analysis. The leave-one-out procedure (Huberty, 1984) was used for classification purposes.

Pearson's correlation coefficients and the regression relationships between Hyperion narrow-band vegetation indices and soybean grain yield were also analyzed across years. Average values of the vegetation indices were extracted from the corresponding pixels of each field. The following 17 spectral indices were considered in the analysis: 1) Atmospherically Resistant Vegetation Index (ARVI); 2) Enhanced Vegetation Index (EVI); 3) Normalized Difference Vegetation Index (NDVI); 4) Simple Ratio (SR); 5) Moisture Stress Index (MSI); 6) Normalized Difference Infrared Index (NDII); 7) Normalized Difference Water Index (NDWI); 8) Water Band Index (WBI); 9) Plant

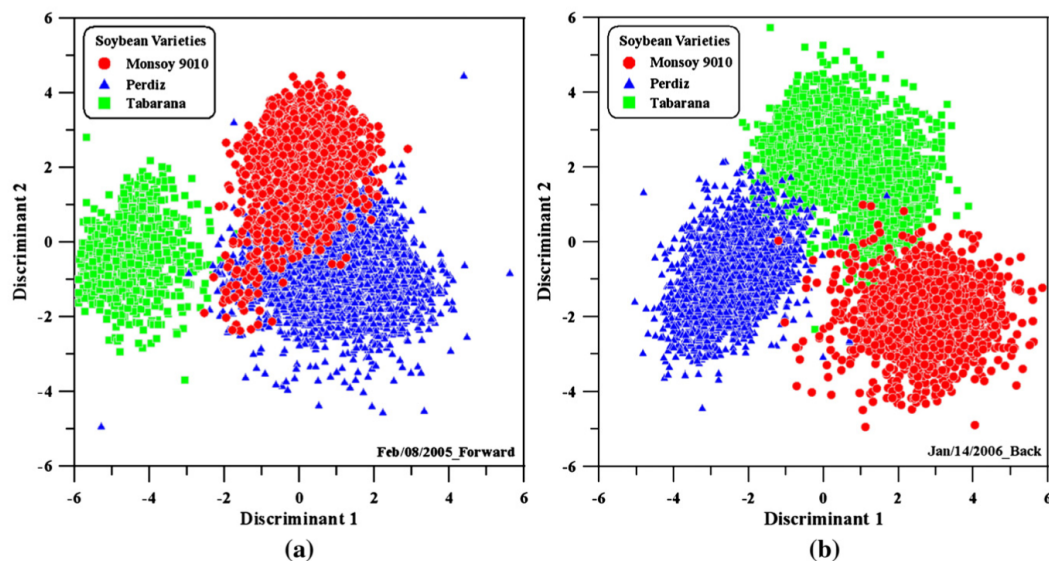


Fig. 3. Projection of the Hyperion discriminant scores of the three soybean varieties in the (a) forward and (b) back scattering directions for different years.

Senescence Reflectance Index (PSRI); 10) Carotenoid Reflectance Index (CRI); 11) Photochemical Reflectance Index (PRI); 12) Structure Insensitive Pigment Index (SIPI); 13) Red Edge Normalized Difference Vegetation Index (RENDVI); 14) Red Edge Position (REP); 15) Vogelmann Red Edge Index 1 (VOG1); 16) Visible Atmospherically Resistant Index (VARI); and 17) Visible Green Index (Vlg). Equations and references for each index are listed in Table 3.

In a broad sense, ARVI, EVI, NDVI, SR, CRI, VARI and Vlg are indices closely related to leaf pigments (e.g., chlorophyll and carotenoids). MSI, NDII, NDWI and WBI are much more associated with leaf water content. PSRI may indicate canopy stress, whereas PRI and SIPI can express light use efficiency. RENDVI, REP and VOG1 are indices designed to characterize spectral variations associated with the red edge position, which may be affected by variations in chlorophyll content or leaf water stress. Some of these indices (e.g., NDVI, EVI, NDWI) are usually correlated to LAI presenting different levels of saturation.

Some of the vegetation indices listed in Table 3 are composed of simple reflectance ratios (e.g., SR, WBI and VOG1). Thus, a simple way to evaluate a greater range of vegetation indices than those listed in Table 3 is to analyze correlations between Hyperion band ratios and soybean grain yield while varying the band in the numerator or denominator. A contour map, which is a two-dimensional representation of three dimensional data, was prepared. The first two dimensions (X and Y coordinates) were used to indicate the denominator and numerator wavelengths of the Hyperion bands used in the ratio calculation, respectively. The third dimension (Z) was used for color coding of the contour intervals with similar Pearson's correlation values (magnitude and sign). An example of a similar representation in a spectral study of lakes was given by George and Malthus (2001).

To complement Hyperion data analysis and to separate soybean reproductive influence from viewing angle effects on NDVI and SR determination, the relationships of the red and NIR MODIS bands with yield were evaluated for a constant reproductive stage and opposite viewing directions (MODIS_Feb/05/2005_Back and MODIS_Feb/06/2005_Forward). As a consequence of the lower spatial resolution of MODIS (250 m) than Hyperion (30 m), the total number of planting

fields in Table 1 were reduced from 50 (Hyperion) to 42 (MODIS) in data analysis.

3. Results and discussion

3.1. Discrimination of soybean varieties across years (Hyperion) and within the same year (MODIS)

Off-nadir Hyperion false color composites from Feb/08/2005_Forward (Fig. 1a) and Jan/14/2006_Back (Fig. 1b) illustrate spectral differences due to illumination-viewing conditions and soybean reproductive stages. The predominance of shadows viewed by the sensor in the forward scattering direction (Fig. 1a) is mainly expressed by dark shades associated with the preserved forest around the Tanguro farm. The predominance of soybean varieties at earlier reproductive stages (Table 2) in the back scattering direction (Fig. 1b) is easily observed for the soybean variety Monsoy 9010 (red color in Fig. 1c), which had the brightest spectral response and some pixels in cyan showing localized soil background influence.

Average Hyperion reflectance spectra of the three varieties produced two distinct clusters with increasing brightness from the forward (shadowed canopy components) to the back (sunlit canopy components) scattering directions (Fig. 2). Soybean canopies at later reproductive stages (Feb/08/2005_Forward) but with greater proportions of shaded canopy components viewed by the sensor had lower average reflectance

Table 6
MDA classification results for 398 pixels of the MODIS_Feb/06/2005 forward scattering image

Soybean variety	Monsoy 9010	Perdiz	Tabarana	Total (pixels)	Producer's accuracy (%)
Monsoy 9010	70	105	9	184	49.3
Perdiz	58	73	15	146	37.4
Tabarana	14	17	37	68	60.7
Total (pixels)	142	195	61	398	
User's accuracy (%)	38.0	50.0	54.4		
Overall accuracy (%)	45.2				

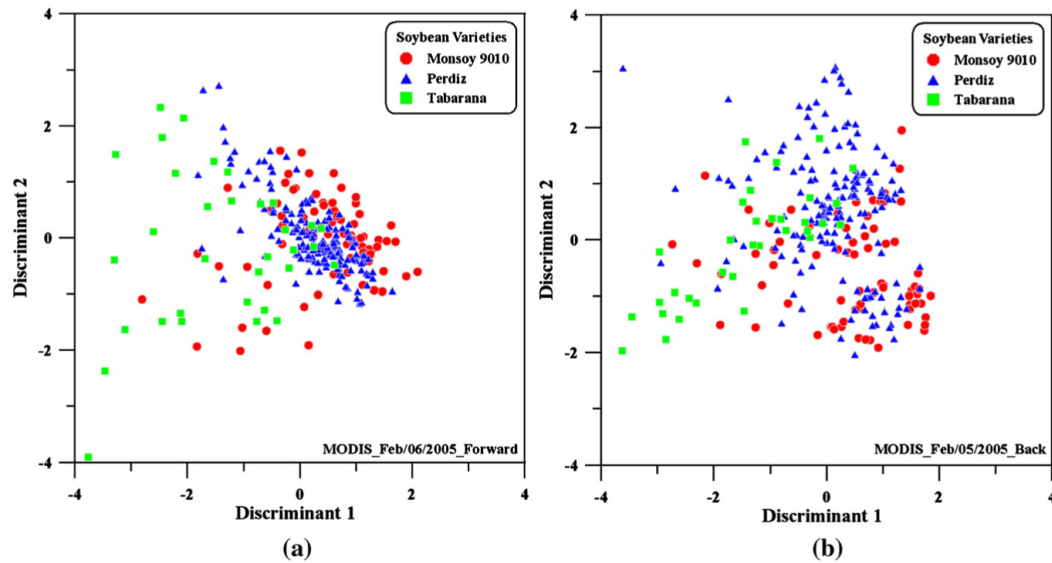


Fig. 4. Projection of the MODIS discriminant scores of the three soybean varieties in the (a) forward and (b) back scattering directions for the same year and reproductive stage.

values than less developed canopies in Jan/14/2006. Back dominated by sunlit canopy components, as indicated in Fig. 2 by dashed and solid lines, respectively. In both directions and reproductive stages, the Monsoy 9010 had the highest Hyperion reflectance (red spectra in Fig. 2). For the same growing season and reproductive stage, MODIS surface reflectance of the red and NIR bands, measured in consecutive days with opposite view directions (+44° and -42°), showed also increasing values for all varieties from MODIS_Feb/06/2005_Forward (open bars) to MODIS_Feb/05/2005_Back (close bars) datasets (Fig. 2).

From MDA Hyperion classification of the varieties, the overall accuracy increased from the forward (91.5% in Table 4) to the back scattering direction (97.2% in Table 5). Except for Tabarana, producer's and user's accuracy values for the other two varieties were larger in the back scattering direction. Score dispersion in the discriminant space of Fig. 3 showed overlap between the Monsoy 9010 and Perdiz groups in the forward scattering direction (Fig. 3a) and good discrimination of the three varieties in the back scattering direction (Fig. 3b). The number of bands that reached the statistical criteria for variable selection was smaller in the forward than in the back scattering direction. The most important difference between the selected bands from the stepwise procedure in Tables 4 and 5 is the absence of blue and green bands in the forward scattering direction. All selected bands showed normal distribution according to the Kolmogorov–Smirnov test.

When applied to 250 m MODIS surface reflectance of bands 1 (red) and 2 (NIR), MDA produced comparatively lower classification accuracies than Hyperion, as expected for both viewing geometries (Tables 6 and 7). In agreement with the Hyperion results, the overall classification accuracy for soybean variety using MODIS was higher in the back scattering view (65.8% in Table 7) than in the forward scattering direction (45.2% in Table 6). MODIS MDA scores (Fig. 4) showed also a better discrimination between Monsoy 9010 and Perdiz in the back scattering direction, which was consistent with results of Tables 6 and 7.

3.2. Off-nadir Hyperion-derived vegetation indices and soybean grain yield across years

When correlated with soybean yield, statistically significant relationships with Hyperion band ratios were observed, as shown in

the correlation contour map of Fig. 5. In the forward scattering direction, NIR/NIR band ratios (e.g., 1200/950 nm) had the most negative correlation coefficients to yield (cyan and green colors in Fig. 5a), whereas SWIR/VIS band ratios (e.g., 2250/570 nm; blue color in Fig. 5a) showed the largest positive correlations. In the back scattering view, the strongest positive correlations occurred when the numerator was in the NIR (close to 800 nm) and the denominator was in the blue (487 nm) and red (681 nm) chlorophyll absorption regions (blue color in Fig. 5b). This result is consistent with several studies that showed positive correlations between NIR/red vegetation indices and crop LAI or yield (e.g., Aparicio et al., 2000; Ma et al., 2001). The SWIR (e.g., 2304 nm) also had high positive correlations, especially when combined with either the visible (487 nm or 681 nm) or the SWIR (1649 nm) in the denominator. However, the most important result in the back scattering direction was the strongest negative correlations (yellow and red colors in Fig. 5b) observed for NIR/NIR band ratios (e.g., 1290/770 nm) mainly associated with leaf water spectral features that became deeper with increasing yield.

Fig. 6 shows the relationships for the 1290/770 nm band ratio, which had improved correlation coefficients from the forward ($r = -0.14$ in Fig. 6a; not significant at the 0.01 level) to the back ($r = -0.63$ in Fig. 6b) scattering directions. In a few words, an increase in soybean yield produces lower 1290/770 nm band ratio values or deeper leaf water absorption features in the NIR.

Table 8 shows correlation coefficients for the relationships between soybean grain yield and narrow-band vegetation indices

Table 7
MDA classification results for 398 pixels of the MODIS_Feb/05/2005 back scattering image

Soybean variety	Monsoy 9010	Perdiz	Tabarana	Total	Producer's accuracy (%)
Monsoy 9010	90	46	0	136	63.4
Perdiz	32	133	22	187	68.2
Tabarana	20	16	39	75	63.9
Total	142	195	61	398	
User's accuracy (%)	66.2	71.1	52.0		
Overall accuracy (%)	65.8				

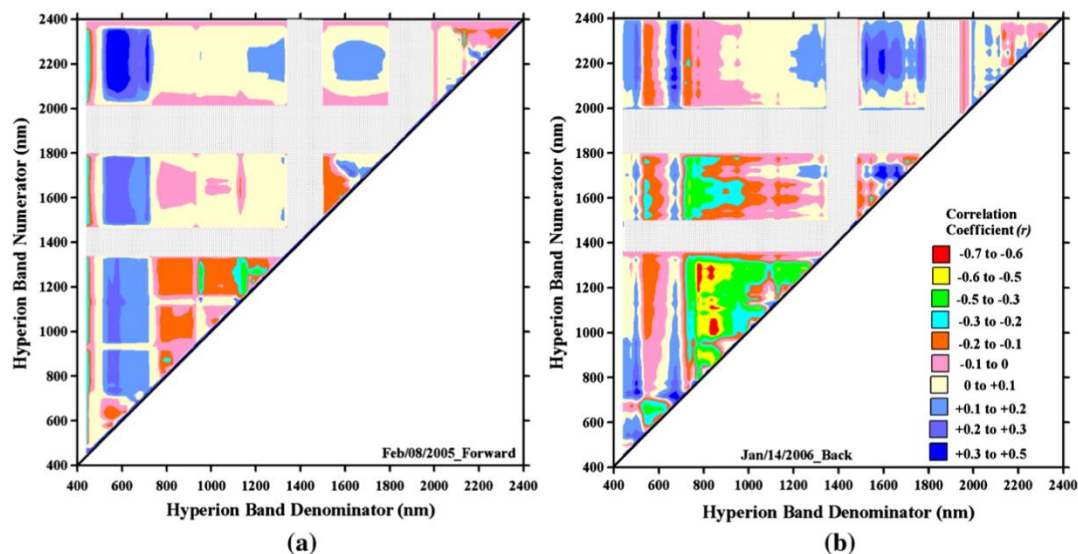


Fig. 5. Variations in Pearson's correlation coefficients for the relationships between soybean grain yield and all possible Hyperion reflectance ratios in the (a) forward and (b) back scattering directions. Results around 1400 nm and 1900 nm are not represented due to atmospheric water vapor absorption.

for the Feb/08/2005_Forward and Jan/14/2006_Back Hyperion datasets. In agreement with band ratio results of Fig. 5, the best vegetation index to estimate soybean grain yield was NDWI ($r=+0.74$ in Table 8) in the back scattering direction. Other positive and statistically significant correlations were observed for EVI in the forward scattering direction ($r=+0.50$) and for WBI ($r=+0.47$) and CRI ($r=+0.53$) in the back scattering direction. Regression relationships between NDWI and soybean grain yield were positive ranging from $+0.12$ (Fig. 7a; not significant) to $+0.74$ (Fig. 7b; significant at the 0.01

level) from the forward to the back scattering direction. The root mean square error (RMSE) value was 318.56 kg/ha for the three studied varieties in 2006.

3.3. Relationships of MODIS-derived NDVI and SR with yield at the same soybean reproductive stage

Variation in Hyperion correlations shown in Table 8 may be influenced by reproductive stage (R4–R6 for Feb/08/2005_Forward

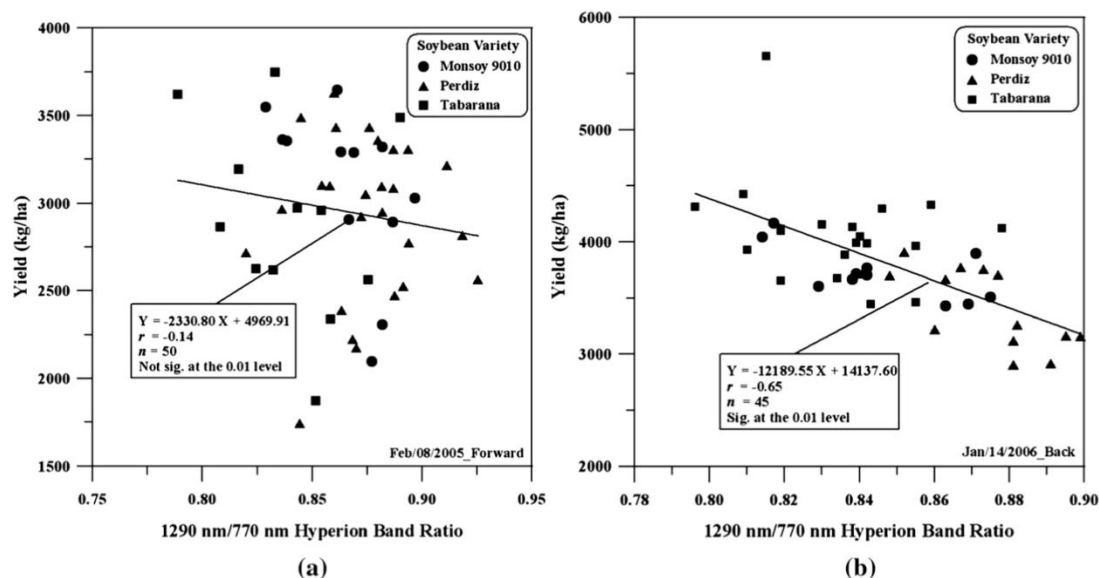


Fig. 6. Relationships between soybean grain yield and the 1290/770-nm Hyperion band ratio in the (a) forward and (b) back scattering directions.

Table 8

Pearson's correlation coefficients between Hyperion-derived vegetation indices and soybean grain yield for images acquired in Feb/08/2005_Forward and in Jan/14/2006_Back

Viewing	ARVI	EVI	NDVI	SR	MSI	NDII	NDWI	WBI	PSRI	CRI	PRI	SIPI	RENDVI	REP	VOG	VARI	Vig
Forward	+0.37	+0.50 ^a	+0.31	+0.34	0.00	0.00	+0.12	+0.10	-0.22	+0.09	+0.14	-0.37	+0.30	-0.05	+0.26	+0.24	+0.23
Backward	+0.08	+0.42	+0.12	+0.13	-0.32	+0.36	+0.74 ^a	+0.47 ^a	+0.17	+0.53 ^a	+0.09	-0.05	-0.14	+0.09	-0.01	+0.32	+0.40

^a Correlation significant at the 0.01 level.

and R1–R3 for Jan/14/2006_Back) or viewing geometry differences, or even by a combination of both factors. Contrary to previous studies, poor correlations in Table 8 were observed at later reproductive stages (Feb/08/2005_Forward; R4 to R6) than at earlier stages of soybean development (Jan/14/2006_Back; R1 to R3). According to the field experiment by Ma et al. (2001), correlations between vegetation indices and soybean grain yield tend to show a progressive improvement from R2 to R5 stages. In the present study, this behavior was not observed potentially due to the spectral influence of canopy shadows viewed by Hyperion in the forward scattering direction (Feb/08/2005_Forward).

To confirm this hypothesis, keeping reproductive stage as a constant factor and varying view angle direction, the relationships of the red and NIR MODIS bands with soybean yield were analyzed for the MODIS_Feb/06/2005_Forward and MODIS_Feb/05/2005_Back datasets, respectively (Figs. 8 and 9). Comparison of Figs. 8 and 9 indicated that shadowing effects were stronger on the red band in the forward scattering direction due to the lower and lesser variable reflectance measured by the sensor in this view. Such effects affected the relationships with soybean yield (r of -0.10 in Fig. 8a against -0.58 in Fig. 9a). As a consequence of the viewing geometry influence, relationships between NDVI and soybean yield improved from the forward (r of $+0.21$ in Fig. 10a) to the back scattering direction (r of $+0.60$ in Fig. 10b). Similarly, correlations between SR and soybean yield increased from $+0.22$ (not significant at the 0.01 level) to $+0.58$ (significant).

Results of Figs. 8–10 are in agreement with those obtained by Leblon et al. (1996) and Walter-Shea et al. (1997), who pointed out that the red radiation is much more affected by shadows than the NIR

radiation. Consequently, shadowing effects on the spectral reflectance of the targets are not completely removed after the NDVI or SR calculation. As demonstrated by Walter-Shea et al. (1997), the magnitude of NDVI variation with view geometry in crops is dependent on solar elevation and LAI values. According to them, higher correlations between NDVI and biophysical parameters are usually observed in the back scattering direction when compared to the forward scattering view.

4. Conclusions

Considering the specific questions addressed in this study, the following conclusions were obtained from the combined analysis of off-nadir Hyperion and MODIS data:

- The discrimination of the three soybean varieties improved from the forward to the back scattering direction, as deduced from MDA classification results of off-nadir Hyperion data from different growing seasons and of MODIS data from the same growing season and reproductive stage;
- The best Hyperion-derived vegetation index to estimate soybean yield was NDWI ($r=+0.74$) in the back scattering direction and this result was consistent with band ratio analysis. Other statistically significant correlations were observed for EVI in the forward scattering direction ($r=+0.50$) and for WBI and CRI in the back scattering direction (r values of $+0.47$ and $+0.53$, respectively);
- The relationships differed between Hyperion datasets due to differences in reproductive stages or viewing geometry, or a

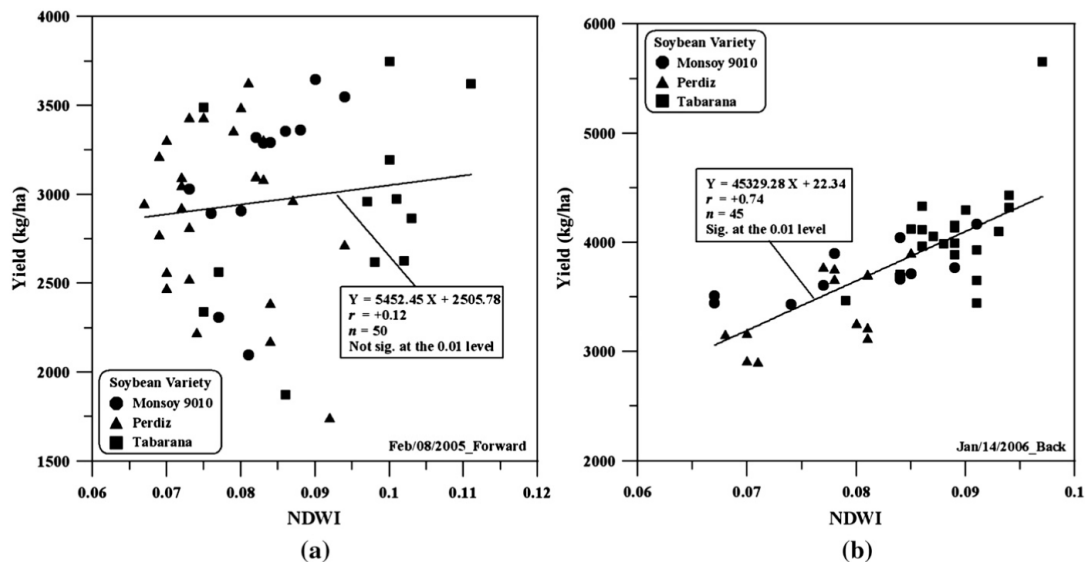


Fig. 7. Relationships between soybean grain yield and Hyperion-derived NDWI values in the (a) forward and (b) back scattering directions.

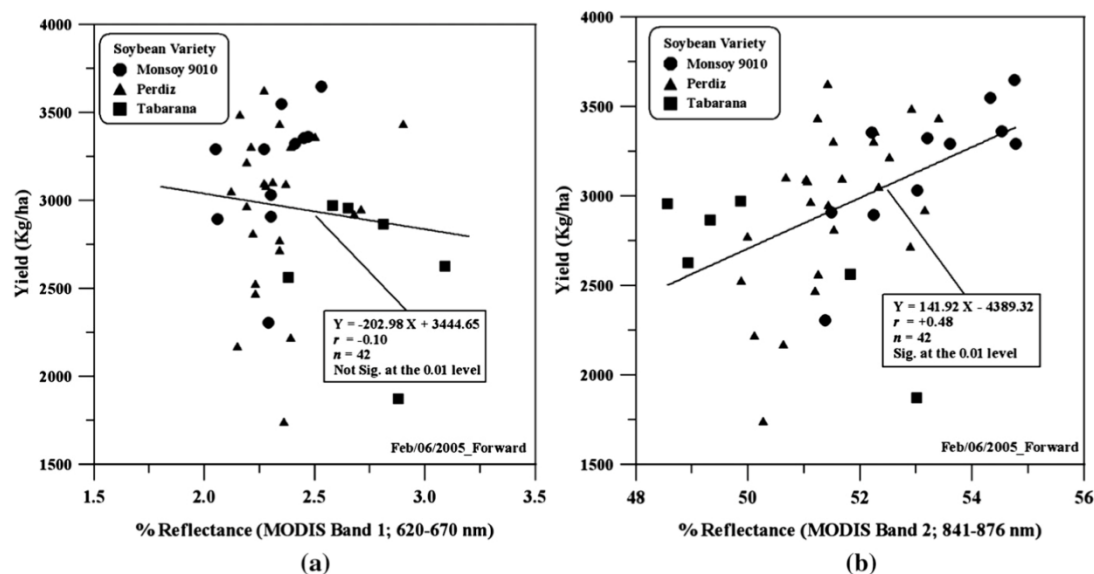


Fig. 8. Relationships of the MODIS (a) red and (b) near infrared bands with soybean yield in the forward scattering direction (+44° view angle) for the same reproductive stage.

combination of both factors. Better correlation results were observed on Jan/14/2006_Back (dominance of sunlit canopy components for the sensor) and at earlier reproductive stages when compared to the image acquired on Feb/08/2005_Foward (predominance of shaded canopy components). From analysis of MODIS data (250 m of spatial resolution) acquired in consecutive days (05–06 February 2005) at a constant soybean reproductive stage and with opposite view angles (−42° and +44°, respectively), stronger shadowing effects on reducing

MODIS red reflectance for the sensor were observed in the forward scattering direction. As a result of the viewing geometry influence, the relationships between NDVI and soybean yield improved from the forward (r of +0.21) to the back scattering direction (r of +0.60). The same trend was observed for SR that increased from +0.22 to +0.58.

Due to the unavailability of more Hyperion images to sense the same growing season at different reproductive stages and viewing

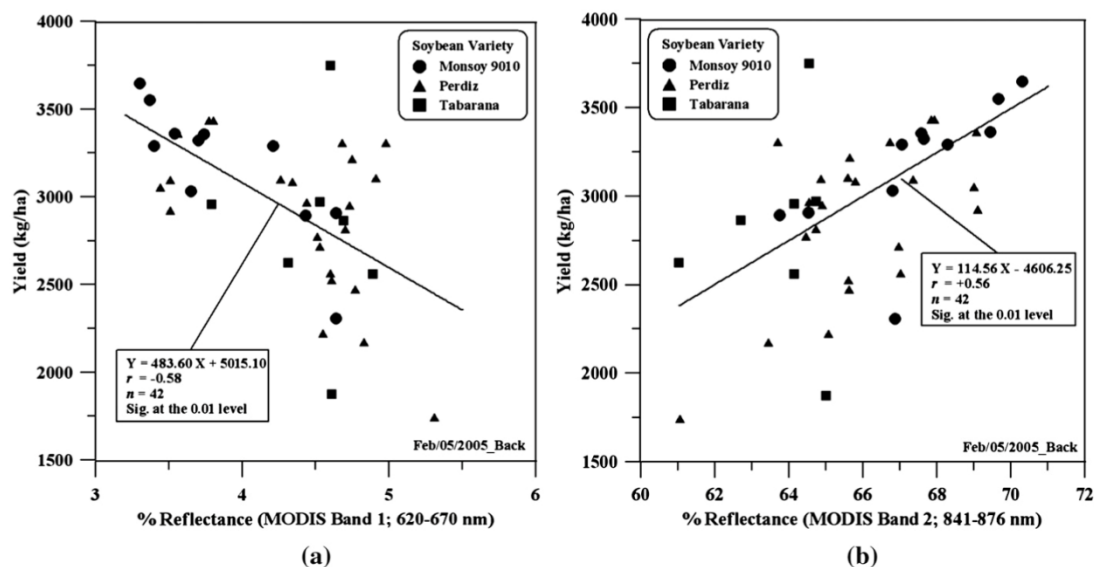


Fig. 9. Relationships of the MODIS (a) red and (b) near infrared bands with soybean yield in the back scattering direction (−42° view angle) for the same reproductive stage.

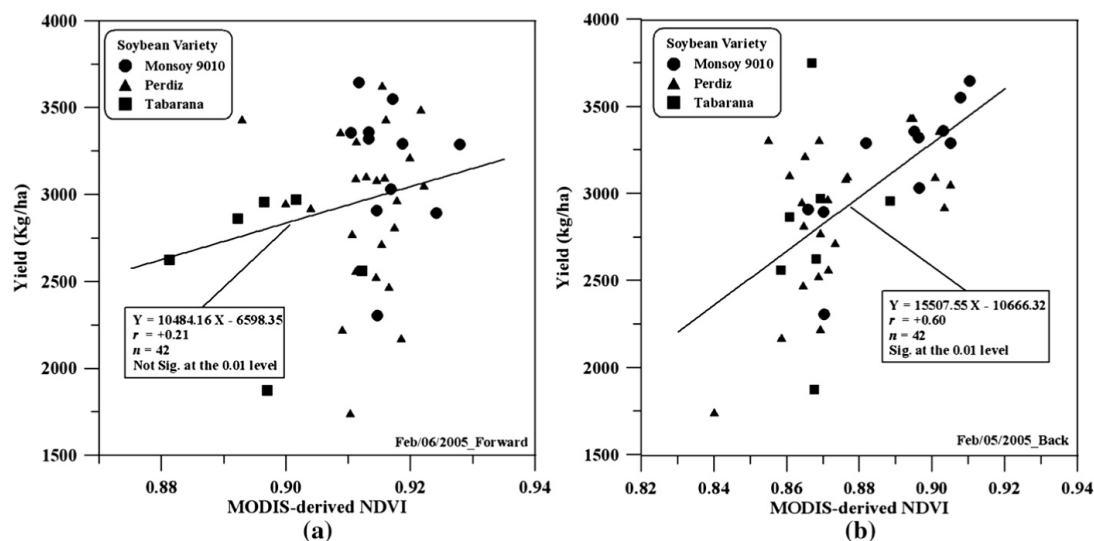


Fig. 10. Relationships between MODIS-derived NDVI and soybean yield in the (a) forward and (b) back scattering directions for the same reproductive stage.

geometries, further research is still necessary to better evaluate view angle effects on the relationships between narrow-band vegetation indices and yield, as a function of LAI and nadir data. Furthermore, MODIS data do not allow NDWI calculation with spatial resolution better than 500 m to confirm the potential of this index, calculated from back scattering direction, for earlier soybean yield prediction in the study area.

Acknowledgements

The authors are very grateful to Grupo Maggi for providing soybean ground information for this research. Thanks are also due to the FAPESP (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo), the CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico), and to the anonymous reviewers for the very useful comments.

References

- Apan, A., Held, A., Phinn, S., & Markley, J. (2004). Detecting sugarcane 'orange rust' disease using EO-1 Hyperion hyperspectral imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 25(2), 489–498.
- Aparicio, N., Villegas, D., Casadesus, J., Araus, J. L., & Royo, C. (2000). Spectral vegetation indices as nondestructive tools for determining durum wheat yield. *Agronomy Journal*, 92(1), 83–91.
- Aparicio, N., Villegas, D., Royo, C., Casadesus, J., & Araus, J. L. (2004). Effect of sensor view angle on the assessment of agronomic traits by ground level hyper-spectral reflectance measurements in durum wheat under contrasting Mediterranean conditions. *International Journal of Remote Sensing*, 25(6), 1131–1152.
- Bauer, M. E., Daughtry, C. S. T., Biehl, L. L., Kanemasu, E. T., & Hall, F. G. (1986). Field spectroscopy of agricultural crops. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 24(1), 65–75.
- Chang, J., Clay, D. E., Dalsted, K., Clay, S., & O'Neill, M. (2003). Corn (*Zea mays* L.) yield prediction using multispectral and multivariate reflectance. *Agronomy Journal*, 95(6), 1550–1559.
- Clevers, J. G. P. W. (1997). A simplified approach for yield prediction of sugar beet based on optical remote sensing data. *Remote Sensing of Environment*, 61(2), 221–228.
- Corrêa, J. C. (2002). Effect of cropping systems on the stability of red-yellow latosol aggregates in Querência, Mato Grosso, Brazil. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 37(2), 203–209 (In Portuguese).
- Curran, P. J., Windham, W. R., & Gholz, H. L. (1995). Exploring the relationship between reflectance red edge and chlorophyll concentration in slash pine leaves. *Tree Physiology*, 15(3), 203–206.
- Doraiswamy, P. C., Hatfield, J. L., Jackson, T. J., Akhmedov, B., Prueger, J., & Stern, A. (2004). Crop condition and yield simulations using Landsat and MODIS. *Remote Sensing of Environment*, 92(4), 548–559.
- Dwyer, J., & Schmidt, G. (2006). The MODIS reprojection tool. In J. J. Qu, W. Gao, M. Kafatos, R. E. Murphy, & V. V. Salomonson (Eds.), *Earth science satellite remote sensing* (pp. 162–177). Berlin Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Fehr, W. R., & Caviness, C. E. (1977). Stages of soybean development. *Iowa State Agriculture and Home Economics Experiment Station and Cooperative Extension Service Ames, Iowa: Iowa State University of Science and Technology Special Report* 80. 11 pp.
- Felde, G. W., Anderson, G. P., Adler-Golden, S. M., Matthew, N. W., & Berk, A. (2003). Analysis of Hyperion data with the FLAASH atmospheric correction algorithm. *Proceedings of the International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, Toulouse, 21–25 July 2003 (pp. 90–92).
- Galvão, L. S., Formaggio, A. R., & Tisot, D. A. (2005). Discrimination of sugarcane varieties in Southeastern Brazil with EO-1 Hyperion data. *Remote Sensing of Environment*, 94(4), 523–534.
- Gamon, J. A., Serrano, L., & Surfus, J. S. (1997). The photochemical reflectance index: An optical indicator of photosynthetic radiation use efficiency across species, functional types, and nutrient levels. *Oecologia*, 112(4), 492–501.
- Gao, B. C. (1996). NDWI—A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote Sensing of Environment*, 58(3), 257–266.
- George, D. G., & Malthus, T. J. (2001). Using a compact airborne spectrographer imager to monitor phytoplankton biomass in a series of lakes in north Wales. *The Science of the Total Environment*, 268(1–3), 215–226.
- Gitelson, A. A., Kaufman, Y. J., Stark, R., & Rundquist, D. (2002). Novel algorithms for remote estimation of vegetation fraction. *Remote Sensing of Environment*, 80(1), 76–87.
- Gitelson, A. A., Merzlyak, M. N., & Lichtenthaler, H. K. (1996). Detection of red edge position and chlorophyll content by reflectance measurements near 700 nm. *Journal of Plant Physiology*, 148(3–4), 501–508.
- Gitelson, A. A., Zur, Y., Chivkunova, O. B., & Merzlyak, M. N. (2002). Assessing carotenoid content in plant leaves with reflectance spectroscopy. *Photochemistry and Photobiology*, 75(3), 272–281.
- Goodenough, D. G., Dyk, A., Niemann, K. O., Pearlman, J. S., Chen, H., Han, T., et al. (2003). Processing Hyperion and AVI for forest classification. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 41(6), 1321–1331.
- Green, A. A., Berman, M., Switzer, P., & Craig, M. D. (1988). A transformation for ordering multispectral data in terms of image quality with implications for noise removal. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 26(1), 65–74.
- Hefflig, L. S., Câmara, G. M. S., Marques, L. A., Pedrosa, D. B., & Piedade, S. M. S. (2006). Closed canopy and leaf area index of soybean in different space arrangements. *Bragantia*, 65(2), 285–295 (In Portuguese).
- Huberty, C. J. (1984). Issues in the use and interpretation of discriminant analysis. *Psychological Bulletin*, 95(1), 156–171.
- 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*, 83(1–2), 195–213.
- Hunt, E. R., & Rock, B. N. (1989). Detection of changes in leaf-water content using near-infrared and middle-infrared reflectances. *Remote Sensing of Environment*, 30(1), 43–54.
- Inoue, Y., Penuelas, J., Miyata, A., & Mano, M. (2008). Normalized difference spectral indices for estimating photosynthetic efficiency and capacity at a canopy scale derived from hyperspectral and CO₂ flux measurements in rice. *Remote Sensing of Environment*, 112(1), 156–172.

- Kaufman, Y. J., & Tanré, D. (1992). Atmospherically resistant vegetation index (ARVI) for EOS-MODIS. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 30(2), 261–270.
- Kollenkark, J. C. V., Vanderbilt, V. C., Daughtry, C. S. T., & Bauer, M. E. (1982). Influence of solar illumination angle on soybean canopy reflectance. *Applied Optics*, 21(7), 1179–1184.
- Leblon, B., Gallant, L., & Granberg, H. (1996). Effects of shadowing types on ground-measured visible and near-infrared shadow reflectances. *Remote Sensing of Environment*, 58(3), 322–328.
- Li, A. N., Liang, S. L., Wang, A. S., & Qin, J. (2007). Estimating crop yield from multi-temporal satellite data using multivariate regression and neural network. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 73(10), 1149–1157.
- Liu, W. T., & Kogan, F. (2002). Monitoring Brazilian soybean production using NOAA/AVHRR based vegetation condition indices. *International Journal of Remote Sensing*, 23(6), 1161–1179.
- Ma, B. L., Dwyer, L. M., Costa, C., Cober, E. R., & Morrison, M. J. (2001). Early prediction of soybean yield from canopy reflectance measurements. *Agronomy Journal*, 93(6), 1227–1234.
- Merzlyak, M. N., Gitelson, A. A., Chivkunova, O. B., & Rakitin, V. Y. (1999). Non-destructive optical detection of pigment changes during leaf senescence and fruit ripening. *Physiologia Plantarum*, 106(1), 135–141.
- Pearlman, J. S., Barry, P. S., Segal, C. C., Shepanski, J., Beiso, D., & Carman, S. L. (2003). Hyperion, a space-based imaging spectrometer. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 41(6), 1160–1173.
- Penuelas, J., Baret, F., & Filella, I. (1995). Semiempirical indexes to assess carotenoids chlorophyll-a ratio from leaf spectral reflectance. *Photosynthetica*, 31(2), 221–230.
- Penuelas, J., Pinol, J., Ogaya, R., & Filella, I. (1997). Estimation of plant water concentration by the reflectance water index WI (R900/R970). *International Journal of Remote Sensing*, 18(13), 2869–2875.
- Pfeiffer, T. W. (1996). Choosing soybean varieties from yield trials: multiple maturity groups and yield variability. *Journal of Production Agriculture*, 9(3), 371–376.
- Prasad, A. K., Chai, L., Singh, R. P., & Kafatos, M. (2006). Crop yield estimation model for Iowa using remote sensing and surface parameters. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 8(1), 26–33.
- Ranson, K. J., Biehl, L. L., & Bauer, M. E. (1985). Variation in spectral response of soybeans with respect to illumination, view and canopy geometry. *International Journal of Remote Sensing*, 6(12), 1827–1842.
- Rizzi, R., & Rudorff, B. F. T. (2007). MODIS sensor images associated with an agronomic model to estimate soybean grain yield. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 42(1), 73–80 (In Portuguese).
- Rouse, J. W., Haas, R. H., Schell, J. A., & Deering, D. W. (1973). Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. *Proceedings of Third ERTS-1 Symposium, Washington, DC, 10–14 December, NASA, SP-351, vol. 1* (pp. 309–317).
- Royo, C., Aparicio, N., Villegas, D., Casadesus, J., Monneveux, P., & Araus, J. L. (2003). Usefulness of spectral reflectance indices as durum wheat yield predictors under contrasting Mediterranean conditions. *International Journal of Remote Sensing*, 24(22), 4403–4419.
- Rudorff, B. F. T., & Batista, G. T. (1990). Spectral response of wheat and its relationship to agronomic variables in the tropical region. *Remote Sensing of Environment*, 31(1), 53–63.
- Serrano, L., Filella, I., & Penuelas, J. (2000). Remote sensing of biomass and yield of winter wheat under different nitrogen supplies. *Crop Science*, 40(3), 723–731.
- Shanahan, J. F., Schepers, J. S., Francis, D. D., Varvel, G. E., Wilhelm, W. W., Tringe, J. M., et al. (2001). Use of remote-sensing imagery to estimate corn grain yield. *Agronomy Journal*, 93(3), 583–589.
- Shibayama, M., & Akiyama, T. (1991). Estimating grain yield of maturing rice canopies using high spectral resolution reflectance measurements. *Remote Sensing of Environment*, 36(1), 45–53.
- Thenkabail, P. S., Smith, R. B., & Pauw, E. (2000). Hyperspectral vegetation indices and their relationships with agricultural crop characteristics. *Remote Sensing of Environment*, 71(2), 158–182.
- Vogelmann, J. E., Rock, B. N., & Moss, D. M. (1993). Red edge spectral measurements from sugar maple leaves. *International Journal of Remote Sensing*, 14(8), 1563–1575.
- Walter-Shea, E. A., Privette, J., Cornell, D., Mesarch, M. A., & Hays, C. J. (1997). Relations between directional spectral vegetation indices and leaf area and absorbed radiation in alfalfa. *Remote Sensing of Environment*, 61(1), 162–177.
- Wiegand, C. L., Richardson, A. J., Escobar, D. E., & Gerbermann, A. H. (1991). Vegetation indexes in crop assessments. *Remote Sensing of Environment*, 35(2–3), 105–119.
- Xavier, A. C., Rudorff, B. F. T., Moreira, M. A., Alvarenga, B. S., Freitas, J. G., & Salomon, M. V. (2006). Hyperspectral field reflectance measurements to estimate wheat grain yield and plant height. *Scientia Agricola*, 63(2), 130–138.
- Zarco-Tejada, P. J., Ustin, S. L., & Whiting, M. L. (2005). Temporal and spatial relationships between within-field yield variability in cotton and high-spatial hyperspectral remote sensing imagery. *Agronomy Journal*, 97(3), 641–653.

ÍNDICE REMISSIVO

- 6S, xxvii, 16, 50, 144
- AAR, xi, xxvii, 3, 4, 38, 39, 43, 51, 53, 56, 57, 58, 59, 69, 72, 75, 76, 77, 78, 79, 81, 82, 83, 84, 85, 86, 87, 88, 89, 90, 91, 92, 93, 94, 95, 128, 131
- ANA, xxvii, 52
- Ângulo Azimutal Relativo, xxvii, 39, 56, 76, 77, 78, 79, 81, 82, 83, 84, 85, 86, 87, 88, 89, 90, 91, 92, 93, 94, 95
- ANIF, xxvii, 21, 78, 79, 81, 82, 83, 85, 89, 91, 93
- AVIRIS, xxvii, 55, 139
- AZS, xi, xxvii, xxxiii, 2, 4, 5, 21, 22, 38, 39, 51, 53, 56, 57, 58, 59, 65, 69, 72, 73, 75, 76, 77, 78, 79, 80, 83, 84, 85, 86, 87, 88, 89, 90, 91, 92, 93, 94, 95, 128, 131, 133
- AZV, xi, xxvii, xxxiii, 2, 4, 5, 17, 21, 22, 32, 34, 38, 39, 51, 53, 56, 57, 58, 59, 60, 61, 62, 63, 64, 65, 69, 72, 75, 77, 80, 81, 82, 83, 84, 85, 86, 88, 89, 90, 91, 92, 93, 94, 95, 128, 129, 131, 132, 133
- Bioma 3, 119
- Breunig et al., 3, 59, 89, 120, 130
- Broadleaf crops, 67
- Clorofila, xxvii
- Conteúdo de matéria seca, xxvii, 39, 55
- EMBRAPA, xxviii, 1, 7, 8, 9, 137, 138, 139, 140, 148, 149
- Emgopa, 9, 68, 106, 109, 122, 123, 125, 126, 133
- EO1, 49, 51
- Espessura equivalente de água, xxviii, 39, 52, 55
- EVI, xi, xiii, xxviii, 2, 5, 13, 14, 16, 50, 58, 59, 64, 69, 91, 92, 94, 95, 110, 111, 112, 113, 114, 129, 132, 177, 178, 179, 180, 181, 183, 184, 185, 186, 187, 190, 191
- FLAASH, xxviii, 51, 52
- FRB, xxviii, 11, 21, 26, 27, 28, 29, 30, 34, 35, 45, 63, 69, 74, 75
- Galvão et al., 51, 99, 129, 179
- Geometria de iluminação, 21
- Hyperion, ii, xi, 5, 12, 14, 16, 17, 46, 49, 51, 52, 56, 57, 71, 72, 99, 127, 128, 129, 136, 139, 141, 147, 150, 187
- Índice de área foliar, 50
- Índices de vegetação, 13, 14, 31, 32, 64
- Latossolo Vermelho-Amarelo seco, 55
- LUT, xxix, 3
- Main Algorithm, 179
- Matlab, 52, 56
- Monsoy 8914, 48, 68, 124, 125, 189
- NDVI, xi, xiii, xxix, 2, 3, 4, 5, 13, 14, 16, 24, 28, 31, 32, 33, 34, 37, 50, 58, 59, 61, 62, 64, 67, 68, 69, 79, 89, 90, 91, 93, 94, 105, 106, 107, 108, 109,

110, 111, 113, 114, 115, 117, 120,
 121, 122, 123, 124, 125, 126, 127,
 128, 130, 131, 132, 133, 136, 138,
 142, 143, 146, 148, 177, 178, 179,
 180, 181, 183, 184, 185, 186, 187,
 188, 190, 191
 NDWI, xxx, 2, 13, 14, 33, 58, 63, 93,
 94, 113, 139, 179, 180, 181, 186, 187
 NIR, 178, 183, 184, 185, 191
 Normalização angular, 115
 OMAFRA, 49, 125, 147
 Perdiz, 9, 48, 56, 72, 74, 75, 95, 96, 97,
 98, 99, 101, 102, 104, 110, 111, 131,
 180, 183, 185, 189, 191
 PROSAIL, ii, xi, xxx, 4, 5, 36, 37, 38,
 39, 40, 41, 42, 43, 52, 53, 54, 55, 56,
 58, 59, 69, 70, 71, 72, 74, 75, 78, 80,
 84, 85, 88, 89, 91, 95, 96, 97, 98,
 110, 113, 114, 127, 128, 131, 132
 PROSPECT, xxx, 4, 36, 38, 93, 139,
 142, 143
 Querência, xi, 46, 137, 180
 Red Edge, xxx, xxxi, 13
 SAIL, xxx, 4, 36, 38, 135, 143, 151
 Soja, ii, 8, 9, 10, 137, 138, 139, 140,
 141, 145, 147, 148, 149
 SWIR, xxxi, 2, 15, 17, 26, 27, 41, 50,
 62, 64, 71, 74, 75, 83, 84, 85, 87, 88,
 100, 113, 132, 178, 184, 186
 Tabarana, 9, 48, 56, 99, 100, 189
 TRMM, xxxi, 52, 139, 180
 Variedades, 9
 Verhoef, 36
 Wilcoxon, xi, xxxi, 43, 64, 113, 114,
 182, 184, 185, 190
 WIST, xxxi, 49, 143, 180

PUBLICAÇÕES TÉCNICO-CIENTÍFICAS EDITADAS PELO INPE

Teses e Dissertações (TDI)

Teses e Dissertações apresentadas nos Cursos de Pós-Graduação do INPE.

Manuais Técnicos (MAN)

São publicações de caráter técnico que incluem normas, procedimentos, instruções e orientações.

Notas Técnico-Científicas (NTC)

Incluem resultados preliminares de pesquisa, descrição de equipamentos, descrição e ou documentação de programa de computador, descrição de sistemas e experimentos, apresentação de testes, dados, atlas, e documentação de projetos de engenharia.

Relatórios de Pesquisa (RPQ)

Reportam resultados ou progressos de pesquisas tanto de natureza técnica quanto científica, cujo nível seja compatível com o de uma publicação em periódico nacional ou internacional.

Propostas e Relatórios de Projetos (PRP)

São propostas de projetos técnico-científicos e relatórios de acompanhamento de projetos, atividades e convênios.

Publicações Didáticas (PUD)

Incluem apostilas, notas de aula e manuais didáticos.

Publicações Seriadas

São os seriados técnico-científicos: boletins, periódicos, anuários e anais de eventos (simpósios e congressos). Constan destas publicações o Internacional Standard Serial Number (ISSN), que é um código único e definitivo para identificação de títulos de seriados.

Programas de Computador (PDC)

São a seqüência de instruções ou códigos, expressos em uma linguagem de programação compilada ou interpretada, a ser executada por um computador para alcançar um determinado objetivo. São aceitos tanto programas fonte quanto executáveis.

Pré-publicações (PRE)

Todos os artigos publicados em periódicos, anais e como capítulos de livros.

