Variação do fator de reflectância bidirecional da floresta de Missiones, Argentina: Integração de dados MODIS através do Google Earth Engine

Vandoir Bourscheidt¹ Fábio Marcelo Breunig²

¹Universidade Federal de São Carlos - UFSCar Rodovia Washington Luís, s/n - Jardim Guanabara, São 13565-905– São Carlos - SP, Brasil vandoir@gmail.com

> ² Universidade de Federal de Santa Maria – UFSM Caixa Postal 73 - 98400-000 – Frederico Westphalen - RS, Brasil fabiobreunig@gmail.com

Abstract. The evaluation of large forest areas always is a challenge considering the traditional methods for forest assessment. By using remote sensing data, a new time and spatial coverage became possible. However, the big data availability represents a constraint to personal computer based approaches. Thus, using cloud based systems; the treatment of big data is now possible. Thus, our goal was to assess the forest dynamic considering the dependence of reflectance from the view and illumination geometry. For that, we analyzed the complete series of Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) daily surface reflectance data (2000-2016) using the Google Earth Engine, a powerful cloud based platform to process and analyze geospatial data. The study area covered the Misiones (Argentina) and the Parque Estadual do Turvo (Brazil). To evaluate the red and near infrared reflectance as a function of view and illumination geometry, we calculated the view direction based on the relative azimuth angle and sliced the view zenith angle as: nadir (\pm 5°); 5°-15°; 15°-25°; 25°-35°; 35°-45°; 45°-55°; and >55° (for backscattering and forward scattering directions). To evaluate the solar zenith effect, only nadir acquired data were averaged for the 16 year and sliced into four classes of solar zenith angle: < 30°; 30°-40°; 40°-50°; and > 50°. The results clearly showed that backscattering reflectance is higher than forward scattering reflectance. Red band did not present clear seasonality in our data, but the near infrared presented well-defined dependence on view and illumination direction.

Palavras-chave: view gemetry, forest dynamics, time series, geometria de visada, dinâmica florestal, séries temporais.

1. Introdução

A extração de informações de dados de sensoriamento remoto já é realidade em áreas como a agricultura, geociências, ambiental e florestal. Dentre as vantagens dessa técnica, destacamse o baixo custo para obter informações espacialmente contínuas e em escalas local, regional ou continental; a possibilidade de gerar estimativas de parâmetros biofísicos da vegetação com base em modelos físicos e empíricos; o fato de não requerer intervenção no ambiente (não destrutivo) e, em geral, de apresentar viabilidade econômica e de tempo de execução (Gibbs et al., 2007; Goetz et al., 2009; Sánchez-Azofeifa et al., 2009). Além disso, boa parte das aplicações relacionadas a mudanças do uso da terra e monitoramento florestal requer alta frequência temporal (Baret et al., 2007). Devido a essa demanda, um grande número de satélites foi lançado nas últimas décadas carregando os mais diversos sistemas sensores em termos de resoluções. Essa diversidade de sensores pode implicar em limitações associadas a geometria de aquisição considerando a visada lateral ou mesmo, sensores de amplo campo de visada com alta repetitividade temporal (Breunig et al., 2015; Galvão et al., 2011).

As séries de dados gerados pelo sistema de observação da Terra (EOS - Earth Observing System) desde 2000 têm sido amplamente utilizadas para acessar a dinâmica de grandes ecossistemas terrestres (Xiong et al., 2005; Xiong e Barnes, 2005; Friedl et al., 2000; Hill et al., 2011; Luch e Lewis, 2000). O Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) a bordo do satélite Terra tem sido aplicado em diversos estudos florestais (Marsden et al., 2010;

Tan et al., 2005; Zhang et al., 2014; Pennec et al., 2011), alguns deles explorando os efeitos de geometria de visada e iluminação (Moura et al., 2012; Maeda e Galvão, 2015).

O MODIS/Terra, que passa sobre o equador aproximadamente às 10:30 horas, permite a aquisição de 36 bandas espectrais no intervalo de 405 a 14385 nm. A sensibilidade radiométrica das 36 bandas é de 12 bits. A resolução espacial do MODIS é de 250 m (duas bandas), 500 m (cinco bandas) e 1000 m (29 bandas). Devido à capacidade de visada lateral nominal de 55° para cada lado, o MODIS recobre uma faixa de 2330 km. O tempo de revisita varia de um a dois dias, conforme a latitude (Xiong et al., 2005; NASA, 2009). Devido ao comportamento não-lambertiano dos alvos, uma grande variação espectral pode ser observada quando imagens diárias do MODIS são utilizadas, principalmente em função dos diferentes 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-composições de 8, 16 ou 30 dias. Em cada período ou composição, os melhores pixels são selecionados com base em critérios de menor contaminação atmosférica e de ângulos de visada mais favoráveis. Detalhes do sensor são discutidos em Xiong et al. (2005).

Em função de gerar uma enorme gama de dados, a utilização dos dados MODIS/Terra muitas vezes é limitada pela capacidade de processamento e integração nas plataformas computacionais existentes. Visando possibilitar análises complexas sobre uma gama imensa de dados é que a Google desenvolveu a plataforma Google Earth Engine (GEE), que pode ser considerada atualmente como a "mais avançada plataforma para processamento de informações geoespaciais baseada na nuvem" (Google inc., 2016). O GEE consiste em uma interface de programação (API) que permite desenvolvimento de algoritmos e processamento online (*cloud-based platform*), de forma a conferir ao usuário final todo potencial de armazenamento e processamento da nuvem da Google nas aplicações acadêmicas. Assim, com a utilização dessa ferramenta, é possível analisar grandes áreas e longas séries temporais em muito pouco tempo. Ademais, ao recobrir grandes áreas, é possível criar condições/restrições e análises específicas para condições de visada e iluminação, dada a grande amostragem.

Levando em consideração ainda a representatividade da floresta de Missiones, no nordeste da Argentina, e a presença de fragmentos representativos no sul do Brasil, a avaliação dos efeitos da geometria de visada e iluminação nessa região é fundamental para a correta interpretação da dinâmica florestal utilizando dados de sensoriamento remoto. Diante disso, o objetivo do trabalho consiste na avaliação dos dados de reflectância de superfície do sensor MODIS a bordo da plataforma Terra utilizando o potencial da ferramenta Google Earth Engine.

2. Metodologia

2.1 Área de estudo

A área de estudo é formada por um amplo maciço florestal no nordeste da Argentina e no sul do Brasil (Figura 1). A região é conhecida como o corredor verde de Missiones. No estudo, foi delimitada uma região de 1.814 km², objetivando selecionar apenas regiões de floresta. No Brasil, foi selecionada a região de floresta nativa do Parque Estadual do Turvo (PET, conhecido como parque do Yucumã). A cobertura florestal da região é predominantemente formada por Floresta Subtropical Decidual, com perda de folhas no inverno por parte de algumas espécies de maior porte (SEMA, 2005; Ruschel et al., 2005; Ruschel et al., 2007, Breunig et al., 2015; Balbinot et al., 2016).

Anais do XVIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto -SBSR ISBN: 978-85-17-00088-1



Figura 1. Localização da área de estudo (corredor verde de Missiones), no nordeste da Argentina e sul do Brasil. O retângulo verde identifica a área de estudo.

A seleção dessa área de estudo se ampara no caráter decidual dessa floresta e na sua representatividade espacial no sul do Brasil e no norte da Argentina. As florestas subtropicais representam os maiores fragmentos de floresta nativa do sul do Brasil e cobrem uma área superior a 10.000 km² na província de Missiones na Argentina (Guadagnin, 1994; Bulfe, 2008; Rosa et al., 2013). Toda essa área é pouco estudada em termos da dinâmica da vegetação.

O clima da região é do tipo Cfa (clima subtropical úmido) de acordo com a classificação de Koppen Geiger. Os solos são em boa parte derivado de rochas basálticas, resultando em uma variedade de latossolos. O relevo da região é formado por áreas planas e regiões de relevo recortado, com encostas íngremes (SEMA, 2005). A altitude da região varia de aproximadamente 100 m a 500 m.

2.2 Processamento das imagens e dados de campo

Para o estudo foram utilizadas imagens adquiridas pelo sensor MODIS Terra, para o período de 2000 a 2016. Dentre os diversos produtos disponíveis, foi utilizado o produto MOD09GA (Surface Reflectance Daily L2G Global 1km and 500m). Todos os processamentos foram realizados através da plataforma do Google Earth Engine, mediante a elaboração e ajuste de algoritmos de aquisição, análise e exportação dos resultados utilizando a API baseada em Javascript. O Google Earth Engine, conforme já mencionado, consiste em um novo sistema de análise e processamento de dados na nuvem que recupera os dados de diversos sistemas sensores orbitais, permitindo o seu processamento para as mais variadas aplicações utilizando a estrutura de nuvem da Google.

Desta forma, foram definidos dois polígonos recobrindo um maciço florestal da província de Missiones (Argentina) com uma área de 1.640 km² e um segundo polígono abrangendo o PET (174 km²). Para filtrar a cobertura de nuvens e dados ruidosos, foi utilizada a máscara baseada no arquivo de qualidade do próprio MODIS ("state_1km"). A partir desta filtragem, uma série de procedimentos foram realizados, conforme descrito na próxima seção.

No PET foram conduzidos trabalhos de campo para a avaliação da cobertura florestal e obtenção de alguns parâmetros biofísicos da floresta como o índice de área foliar (IAF), nos anos de 2011, 2012, 2013 e 2014. Os resultados com a caracterização florística e fitossociológica da floresta estão detalhados em Balbinot et al. (2016).

2.3 Análise dos dados

Inicialmente, dos dados de reflectância de superfície foram filtrados de forma a eliminar dados com contaminação de nuvens (apenas pixel com melhor qualidade foram selecionados) em cada imagem. Na sequência foram elaborados perfis (filtros) temporais envolvendo dados de todas as geometrias (visada e iluminação).

Para avaliar o impacto da geometria de visada, foram definidas classes de geometria de visada espaçadas em dez graus nas direções do retroespalhamento (predomínio de dossel iluminado) e do espalhamento frontal (predomínio de sombra). Assim, foram obtidos dados

(02)

(02)

para o intervalo de -55 (retroespalhamento) a 55 (espalhamento frontal) totalizando 13 classes angulares. A classe de -5 a 5 foi considerada como sendo uma aquisição ao nadir.

Para permitir a comparação adimensional dos dados, foi calculado o fator de anisotropia (Sandmeier et al., 1998; Schaepman-Strub et al., 2006). Para tal, todos dos dados adquiridos foram divididos pela reflectância ao nadir e dispostos em porcentagem relativa de variação (multiplicado por 100). Para identificar as direções de espalhamento foi calculado o azimute relativo, dado por:

$$Rel_{Az1} = Sensor_{Az} - 180 - Solar_{AZ} \tag{01}$$

$$Rel_{AZ1} < -180 => Rel_{AZ} = Rel_{AZ1} + 360$$
 (02)

Se

$$Rel_{AZ1} > 180 => Rel_{AZ} = Rel_{AZ1} - 360$$
 (05)

onde Rel_{AZ} é o ângulo azimutal relativo final, o Rel_{AZ1} é o ângulo azimutal relativo inicial. Assim, o Rel_{AZ} pode assumir valores de ±180°. Quando o módulo do Rel_{AZ} é inferior a 90° assumimos que o dado deriva da direção do espalhamento frontal e quando o módulo do Rel_{AZ} é maior que 90°, os dados foram obtidos da direção do retroespalhamento.

Ângulo zenital de visada	Nadir	Ângulo zenital de visada
Retroespalhamento		Espalhamento Frontal
< -55	-5 a 5	5 a 15
-55 a -45		15 a 25
-45 a -35		25 a 35
-35 a -25		35 a 45
-25 a -15		45 a 55
-15 a -5		> 55

Tabela 1. Classes de ângulos utilizados para fazer a análise da influência da geometria de visada sobre a reflectância de superfície.

Para avaliar o efeito da geometria de iluminação, foram selecionados os pixels adquiridos ao nadir e definidas 4 classes de iluminação, considerando a amplitude total do ângulo zenital solar na área de estudo ($<30^\circ$; 30° - 40° ; 40° - 50° e; $>50^\circ$).

Todas as análises foram feitas com base em séries temporais e avaliadas em função da dinâmica da floresta ao longo do ano (considerando a perda de folhas).

Resultados e discussões

A média de 16 anos da reflectância do vermelho (Figura 2) e infravermelho próximo (Figura 3) nitidamente reporta as variações sazonais da vegetação da floresta de missiones. A floresta apresenta uma dinâmica que combina as variações nas características estruturais da florestas e geometria de iluminação (dada a média latitude de aproximadamente 26°S). Assim, inicialmente foi feita uma análise das bandas do vermelho para dados adquiridos na direção do retroespalhamento (Figura 2a) e espalhamento frontal (Figura 2b). Para essa faixa do espectro, mesmo com os dados filtrados, não é possível identificar grandes diferenças em função das direções de espalhamento e geometria de visada.

Considerando a reflectância do infravermelho próximo na direção do retroespalhamento (Figura 3a), por outro lado, verifica-se o efeito da redução do IAF no inverno e as variações da geometria de iluminação. Para a direção do espalhamento frontal esse padrão anual é menos acentuado (Figura 3b). Na Figura 3a é possível perceber a presença do efeito de hot spot durante o inverno, junto com a redução da quantidade de folias (Breunig et al., 2015).

Anais do XVIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto -SBSR ISBN: 978-85-17-00088-1



Figura 2. Variação da reflectância de superfície do vermelho para as direções do (a) retroespalhamento e (b) espalhamento frontal). Os dados estão distribuídos de acordo com o ângulo de visada para cada direção de espalhamento. Os resultados referem-se a média de 16 anos, considerando apenas dados com melhor qualidade (*QA flags*).

No período de verão a maior reflectância ocorre na direção retroespalhamento com ângulo de visada de 30°. Nesse caso, o valor coincide com o menor ângulo zenital solar nessa data. A medida que a elevação solar diminuiu, os ângulos de visada de 40° e 50° se sobrepõem aos de menor geometria de visada (Figura 3ª). Na direção de espalhamento frontal, a reflectância no nadir é superior a reflectância dos demais ângulos durante quase todo ano. Isso mostra que o efeito da sombra reduz o impacto da variação da geometria de iluminação. Outra consequência desse efeito é mostrada através na reposta espectral mais baixa no infravermelho próximo quando comparados o espalhamento frontal ao retroespalhamento. A análise do ANIF confirmou essa realidade.

Os resultados da análise do efeito da geometria de iluminação solar sobre a reflectância de superfície ao nadir $(\pm 5^{\circ})$ mostraram uma gradual transição de pixels advindos de ângulos zenitais de iluminação mais baixos no verão e mais altos no inverno. Assim, verifica-se que no verão, junto com um maior índice de área foliar da floresta, a geometria de iluminação no entorno da normal tente a aumentar a reflectância (hot spot). Por outro lado, a medida que se

aproxima do inverno, os pixels tendem a ser originados de ângulos de iluminação elevados, resultando em maior presença de sombras (Teles et al., 2015; Galvão et al., 2015).

Além disso, a aparente assimetria entre verão e inverno para as geometrias próximas ao nadir, com o máximo de reflectância ocorrendo no mês de novembro, pode estar relacionada com o ciclo anual da elevação solar para o horário de passagem do satélite, que, conforme simulações realizadas, apresenta grande correlação com a curva observada para estas condições (Breunig et al., 2015).



Figura 2. Variação da reflectância de superfície do infravermelho próximo para as direções do (a) retroespalhamento e (b) espalhamento frontal). Os dados estão distribuídos de acordo com o ângulo de visada para cada direção de espalhamento. Os resultados referem-se a média de 16 anos, considerando apenas dados com melhor qualidade. (QA flags).

Apesar do trabalho envolver uma área relativamente grande e uma série diária de 16 anos, a aplicação de limiares de corte associados a presença de nuvens e falhas no dados pode reduzir de forma significativa a disponibilidade de pixels. Assim, a alta taxa de recobrimento temporal não garante a disponibilidade de cenas de boa qualidade. Uma grande variabilidade em dias sucessivos é identificada quando dados diários são utilizados. Assim, a aplicação de filtros é fundamental.

Conclusões

Os resultados mostram que a reflectância na direção do espalhamento frontal é menor quando comparada a reflectância da direção do retroespalhamento. Verificou-se um efeito combinado da perda de folhas e aumento do ângulo zenital de iluminação no inverno, reduzindo a reflectância, além do provável efeito do ciclo anual da elevação solar para geometrias próximas ao nadir.

A ferramenta de processamento Google Earth Engine permitiu discriminar e tratar de forma adequada os dados do MODIS para a área de estudo. Sua grande vantagem é a redução do tempo necessário para processar as informações e também permitir a análise sema necessidade de realizar o download dos arquivos do servidor.

Agradecimentos

Ao Land Processes Distributed Active Archive Center (LP DAAC) e à Google pela disponibilização das imagens de satélite através do acesso gratuito à plataforma Google Earth Engine. Além disso nossos agradecimentos aos desenvolvedores e usuários do GEE pelo compartilhamento dos códigos que foram adaptados de acordo com o propósito do presente estudo. Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - "National Counsel of Technological and Scientific Development" (processos n° 305914/2014-6 e 478085/2013-3). A equipe de campo pela valiosa contribuição para a coleta dos dados.

Referências

- Balbinot, R., Lambrecht, F. R., Breunig, F. M., Trautenmuller, J. W., Galvão, L. S., Denardi, L., & Vendruscolo, R. (2016). Análise fitossociológica de um fragmento de Floresta Estacional Decidual: Parque Estadual do Turvo, RS. *Pesquisa Florestal Brasileira - Brazilian Journal of Forestry Research*, 36(86), 103–113. <u>http://doi.org/10.4336/2016.pfb.36.86.837</u>
- 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. 2007.
- Breunig, F. M., Galvão, L. S., dos Santos, J. R., Gitelson, A. A., de Moura, Y. M., Teles, T. S., & Gaida, W. (2015). Spectral anisotropy of subtropical deciduous forest using MISR and MODIS data acquired under large seasonal variation in solar zenith angle. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, v. 35, part B, p. 294–304. 2015.
- Bulfe, N.M.L. Dinâmica de clareiras originadas de exploração seletiva de uma floresta estacional semidecidual na Provincia de Misiones, nordeste da Argentina. Thesis, 73p. Curitiba: UFPR. 2008. Available at: http://www.floresta.ufpr.br/pos-graduacao/defesas/pdf_ms/2008/d490_0684-M.pdf). Access date: Apr. 20 2014.
- Friedl, M. A., Muchoney, D., McIver, D., Gao, F., Hodges, J. C. F., & Strahler, A. H. Characterization of North American land cover from NOAA-AVHRR data using the EOS MODIS Land Cover Classification Algorithm. *Geophysical Research Letters*, v. 27, n. 7, p. 977–980. 2000.
- Galvão, L. S., dos Santos, J. R., Roberts, D. A., Breunig, F. M., Toomey, M., & de Moura, Y. M. On intraannual EVI variability in the dry season of tropical forest: A case study with MODIS and hyperspectral data. *Remote Sensing of Environment*, v. 115, n. 9, p. 2350–2359. 2011.
- Galvão, L. S., Breunig, F. M., Teles, T. S., Gaida, W., & Balbinot, R. (2015). Investigation of terrain illumination effects on vegetation indices and VI derived phenological metrics in subtropical deciduous forests. *GIScience & Remote Sensing*, v. 1603, p. 15481603.2015.1134140, 2015.
- Gibbs, H. K.; Brown, S.; Niles, J. O.; Foley, J. A. Monitoring and estimating tropical forest carbon stocks: making REDD a reality. *Environmental Research Letters*, v. 2, n. 4, p. 045023, 5 out 2007.
- Goetz, S. J.; Baccini, A.; Laporte, N. T.; *et al.* Mapping and monitoring carbon stocks with satellite observations: a comparison of methods. *Carbon balance and management*, v. 4, p. 2, jan 2009.
- Google Inc. (2016). *Google Earth Engine API*. Disponível em: < https://earthengine.google.com/ >. 1600 Amphitheatre Pkwy, Mountain View, CA 94043, Estados Unidos.

- Guadagnin, D. L. Zonificación del Parque Estadual do Turvo, RS, Brasil, y directivas para el plan de manejo. Universidad Nacional de Córdoba. [sp].1994.
- Hill, M. J., Román, M. O., Schaaf, C. B., Hutley, L., Brannstrom, C., Etter, A., & Hanan, N. P. Characterizing vegetation cover in global savannas with an annual foliage clumping index derived from the MODIS BRDF product. **Remote Sensing of Environment**, v. 115, n. 8) p. 2008–2024. 2011.
- Maeda, E. E., & Galvão, L. S. Sun-sensor geometry effects on vegetation index anomalies in the Amazon rainforest. *GIScience & Remote Sensing*, v. 52, n. 3, p. 332–343. 2015.
- Marsden, C., le Maire, G., Stape, J.-L., Seen, D. Lo, Roupsard, O., Cabral, O., ... Nouvellon, Y. Relating MODIS vegetation index time-series with structure, light absorption and stem production of fast-growing Eucalyptus plantations. *Forest Ecology and Management*, v. 259, n. 9, p. 1741–1753. 2010.
- Moura, Y. M., Galvão, L. S., dos Santos, J. R., Roberts, D. A., & Breunig, F. M. Use of MISR/Terra data to study intra- and inter-annual EVI variations in the dry season of tropical forest. *Remote Sensing of Environment*, v. 127, p. 260–270. 2012.
- Pennec, A., Gond, V., & Sabatier, D. Tropical forest phenology in French Guiana from MODIS time series. *Remote Sensing Letters*, v. 2, *n*. 4, p. 337–345. 2011.
- Rosa, P. A.; Breunig, F. M.; Balbinot, R.; Galvão, L. S. Dinâmica da Floresta do Parque Estadual do Turvo com Índices de Vegetação. *Floresta e Ambiente*, v. 20, n. 4, p. 487–499, 2013.
- Ruschel, A. R., Guerra, M. P., Moerschbacher, B. M., & Nodari, R. O. Valuation and characterization of the timber species in remnants of the Alto Uruguay River ecosystem, southern Brazil. *Forest Ecology and Management*, v. 217, n. 1, p. 103–116. 2005.
- Ruschel, A. R., Nodari, R. O., & Moerschbacher, B. M. Woody Plant Species Richness in the Turvo State Park, a Large Remnant of Deciduous Atlantic Forest, Brazil. *Biodiversity and Conservation*, v. *16*, *n*. 6, p. 1699–1714. 2007.
- Sánchez-Azofeifa, G. A.; Castro-Esau, K. L.; Kurz, W. A.; Joyce, A. Monitoring carbon stocks in the tropics and the remote sensing operational limitations: from local to regional projects. *Ecological applications : a publication of the Ecological Society of America*, v. 19, n. 2, p. 480–94, mar 2009.
- Sandmeier, S., Müller, C., 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.
- Secretaria Estadual do Meio Ambiente (SEMA) RS. *O Plano de Manejo do Parque Estadual do Turvo RS*. Porto Alegre: SEMA, 2005. Disponível em: < www.sema.rs.gov.br/upload/Plano_manejo_PETurvo.pdf >. Acesso em 16 out. 2010.
- Tan, B., Hu, J., Huang, D., Yang, W., Zhang, P., Shabanov, N. V., ... Myneni, R. B. Assessment of the broadleaf crops leaf area index product from the Terra MODIS instrument. *Agricultural and Forest Meteorology*, v. 135, n. 1–4, p. 124–134. 2005.
- 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, cap. 4, p. 77-97. 2005.
- Xiong, X., and Barnes, W. Barnes, MODIS calibration and characterization, Earth Science Satellite Remote Sensing. In: Qu, J.; Gao, W.; Kafatos, M.; Murphy, R.; Salomonson, V. eds., Vol. I, Chapter 4, Springer-Verlag, 2005.
- Zhang, Q., Cheng, Y.-B., Lyapustin, A. I., Wang, Y., Xiao, X., Suyker, A., Middleton, E. M. Estimation of crop gross primary production (GPP): I. impact of MODIS observation footprint and impact of vegetation BRDF characteristics. *Agricultural and Forest Meteorology*, v. 191, p. 51–63. 2014.