

INVENTÁRIO DE CARBONO EM FRAGMENTO DE FLORESTA OMBRÓFILA MISTA POR DETECÇÃO REMOTA

Henrique Luis Godinho Cassol¹, Dejanira Luderitz Saldanha², Tatiana Mora Kuplich³

¹Eng. Florestal, INPE, São José dos Campos, SP, Brasil - henrique@dsr.inpe.br

²Geóloga, Dra. Dep. de Geociências, UFRGS, RS, Brasil - dejanira.saldanha@ufrgs.br

³Bióloga, Dra. Centro Regional Sul, INPE, Santa Maria, RS, Brasil - tmk@dsr.inpe.br

Recebido para publicação: 12/08/2013 – Aceito para publicação: 02/05/2014

Resumo

O trabalho teve como objetivo inventariar o carbono de um fragmento de Floresta Ombrófila Mista utilizando dados provenientes de sensores de média resolução espacial. Uma cena dos sensores ASTER, LISS e TM foi empregada na obtenção dos dados radiométricos (espectrais), e os dados de biomassa e carbono (biofísicos) foram oriundos de parcelas de inventário florestal contínuo em São João do Triunfo, PR. A metodologia consistiu em estabelecer a relação empírica entre esses conjuntos de dados por meio de equações lineares de regressão. À exceção do sensor TM, que apresentou resultado insatisfatório, o uso dos dados oriundos dos sensores LISS e ASTER foi adequado para se inventariar o carbono florestal por detecção remota, com erros inferiores aos estabelecidos nas campanhas de inventários tradicionais ($\alpha < 0,05$).

Palavras-chave: Estoque de carbono; sensoriamento remoto; ASTER; TM; LISS.

Abstract

Carbon inventory in a fragment of Mixed Ombrophylous Forest by remote sensing. The research aims to make inventory of carbon of a fragment of Araucaria Forest using data from medium spatial resolution sensors. Satellite data from ASTER, TM and LISS were used to obtain the radiometric data. The above ground biomass and carbon data (biophysical data) were derived from the continuous forest inventory located in São João do Triunfo, PR. The methodology consisted of establishing the empirical relationship between spectral and biophysical data sets using linear regression. Except for the TM data, which showed unsatisfactory results, the use of ASTER and LISS satellite data was suited to forest carbon inventory by remote sensing, with errors lower than those set in traditional inventory campaigns ($\alpha < 0,05$).

Keywords: Carbon stock; remote sensing; ASTER; TM; LISS.

INTRODUÇÃO

As florestas possuem um papel importante do ponto de vista ambiental, sobretudo pelos serviços ambientais prestados, como a manutenção do clima, dos regimes hidrológicos e da biodiversidade, na purificação do ar e na fixação de dióxido de carbono da atmosfera (CO₂). Esse último, especialmente, tem sido exaustivamente estudado, por tratar-se de um efeito ambiental de mais fácil mensuração se comparado aos demais e por ser um dos gases de efeito estufa (GEE) que mais têm aumentado sua concentração na atmosfera nos últimos anos.

Conforme o *International Panel on Climate Change* (IPCC), estima-se que 20% das emissões globais de carbono são provenientes de desmatamento nos trópicos (PARKER *et al.*, 2008). No Brasil, segundo o relatório do Ministério da Ciência e Tecnologia (MCT), 75% do total das emissões de gases de GEE são oriundos de mudanças no uso da terra; destes, 90% correspondem à conversão de florestas naturais em outros usos (MCT, 2004). Por conta das incertezas atreladas ao baixo conhecimento da biomassa florestal no Brasil, as estimativas de emissões globais de carbono na floresta amazônica brasileira podem variar amplamente, de 1,2 até 2,2 PgC.ano⁻¹ (HOUGHTON *et al.*, 2000). Para Harris *et al.* (2012), as variações metodológicas de medição dos estoques de carbono na vegetação e solos

florestais causam erros expressivos nas estimativas de CO₂ em extensas áreas, na ordem de 25 a 50%. Esses autores reportam ainda que, enquanto a contribuição das emissões de GEE decorrentes da queima de combustíveis é medida com aceitável precisão, as mensurações de emissões de GEE (CO₂) provenientes de mudanças de uso da terra e florestas (*Land Use, Land-Use Change and Forestry (LULUCF)*) no ciclo global do carbono são pouco confiáveis.

Por esse motivo, o órgão subsidiário de assessoramento científico e assessoria técnica (*Subsidiary Body for Scientific and Technical Advice (SBSTA)*) da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre as Mudanças Climáticas (UNFCCC) está concentrado na uniformização metodológica, que inclui os níveis de referências de emissões por desmatamentos e degradações e as taxas de desmatamento a serem empregados em projetos de valoração pelos serviços ambientais prestados, a exemplo da Redução de Emissões por Desmatamento e Degradação Florestal e Aumento de Estoque de Carbono (REDD⁺) (QURESHI *et al.*, 2012). Os níveis de referência (*benchmarks*) serão a linha-base para que as reduções de emissões futuras sejam medidas e potencialmente recompensadas (HARRIS *et al.*, 2012; SAATCHI *et al.*, 2011). A padronização metodológica, portanto, irá resultar na eficácia das medições de reduções de emissões no contexto de um projeto de REDD⁺, na eficiência por dólar gasto e na equidade da distribuição das receitas, por permitir alcançar um nível regional ou nacional de um projeto REDD⁺ (BUSCH *et al.*, 2009).

O inventário de carbono em florestas pelo método destrutivo restringe-se pela escala de trabalho quando realizado em nível global ou até mesmo regional de estoque de carbono, devido ao seu oneroso e laborioso processo de mensuração (GOETZ *et al.*, 2009). Acredita-se, no entanto, que a detecção remota por satélite seja eficiente, porém não a única solução para se alcançar a precisão necessária dos inventários globais de carbono, e muito menos que esta evite as mensurações de carbono *in situ*. Pelo contrário, os estoques locais de carbono, como o realizado neste trabalho, são essenciais tanto para calibrar como para validar as estimativas de carbono derivadas de observações espaciais. Esse fato é particularmente verdadeiro quando os dados de sensoriamento remoto estão correlacionados com os inventários de carbono obtidos pelos métodos destrutivos em uma mesma escala de trabalho (BACCINI *et al.*, 2004).

Dessa forma, o objetivo deste trabalho é inventariar o carbono estocado em fragmento de Floresta Ombrófila Mista (FOM) por meio de técnicas de sensoriamento remoto, tendo em vista o aprimoramento metodológico desse tipo de estimativa.

MATERIAL E MÉTODOS

Caracterização da área de estudo

A área de estudo compreende um fragmento de FOM, objeto do Programa de Pesquisas Ecológicas de Longa Duração (PELD Sítio 9: Floresta com Araucária e suas transições), localizado em São João do Triunfo, região centro-sul do estado do Paraná, a 125 km de Curitiba, com as coordenadas centrais 25°41'20" S e 50°09'45" W (Figura 1).

A área está inserida na Estação Experimental de São João do Triunfo, de propriedade da Universidade Federal do Paraná (UFPR). O local tem cerca de 30 hectares de área de floresta natural e altitude média de 780 metros acima do nível médio do mar (DURIGAN, 1999). Segundo a classificação climática de Köppen, o clima é Cfb – clima temperado propriamente dito; temperatura média no mês mais frio abaixo de 18 °C, com verões frescos, temperatura média no mês mais quente abaixo de 22 °C e sem estação seca definida (INSTITUTO AGRONÔMICO DO PARANÁ (IAPAR), 2000).

A vegetação é caracterizada como um fragmento de Floresta Ombrófila Mista Montana, uma das sete fitofisionomias pertencentes ao Bioma Mata Atlântica, situada em altitudes médias de 400 a 1000 metros, segundo as adaptações de Velloso *et al.* (1991) para a classificação da vegetação brasileira (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE), 1992). Segundo o levantamento do Projeto de Conservação e Utilização Sustentável da Diversidade Biológica Brasileira (ProBIO), ano-base de 2002, essa tipologia florestal cobre 20.000 km² do estado do Paraná, cerca de 10% do estado. A composição florística da FOM tem como espécies predominantes o pinheiro-do-paraná (*Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze) e diversas espécies folhosas, como a imbuia (*Ocotea porosa* (Nees & C. Mart.) Barroso), a erva-mate (*Ilex paraguariensis* A. St.-Hil.), o cedro (*Cedrela fissilis* Vell.), as canelas da família Lauraceae (*Nectandra* spp., *Ocotea* spp.) e membros da família Myrtaceae, entre outras (PROBIO, 2007).

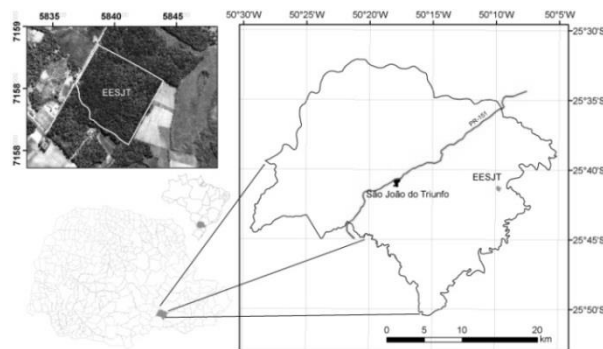


Figura 1. Localização geográfica da Estação Experimental de São João do Triunfo (EESJT). No detalhe, uma imagem *Google Earth* da Estação Experimental.

Figure 1. Geographical location of São João do Triunfo Experimental Station. In detail, *Google Earth* image from experimental station.

Dados biofísicos

Os dados de campo são oriundos de inventário florestal contínuo das parcelas permanentes do PELD, em que todos os indivíduos arbóreos com circunferências à altura do peito superiores a 30 centímetros foram medidos. A biomassa florestal acima do solo foi obtida por meio da equação alométrica ajustada por Ratuchne (2010) em uma FOM localizada em General Carneiro, PR:

$$P = -3,025 \times \text{DAP} + 0,425 \times \text{DAP}^2 + 0,006 \times (\text{DAP}^2 \times h)$$

em que: P = biomassa acima do solo, em kg;
DAP = diâmetro à altura do peito, em cm;
h = altura total, em m.

Os teores de carbono (TC), por sua vez, foram definidos por espécie e grupos de espécies, estabelecidos com base nos dados observados por Watzlawick *et al.* (2004). Os TC encontrados pelos autores variaram de 380,57 g.kg⁻¹ a 430,60 g.kg⁻¹ de carbono para cada quilo de biomassa seca para as espécies de *Ocotea puberula* (Rich.) Nees (canela-guaicá) e *Dicksonia sellowiana* Hook. (xaxim), como mínimo e máximo, respectivamente. Esses valores específicos foram usados para se calcular o estoque de carbono atual da FOM, multiplicando-se simplesmente a biomassa acima do solo pelos teores específicos de carbono.

Dados espectrais

Os dados espectrais são provenientes de três sistemas sensores de média resolução espacial, que operam nas faixas do espectro eletromagnético do visível e infravermelho próximo, ASTER, LISS e TM (siglas descritas abaixo). As características desses três sistemas sensores utilizados estão descritas na tabela 1.

Tabela 1. Características dos sensores ASTER, LISS e TM.

Table 1. ASTER, LISS and TM sensor characteristics.

Sensor	Banda	Resolução			Data de aquisição	
		Espectral (µm)	Espacial (m)	Radiométrica		
ASTER	1	0,52 - 0,60	15	8 bits	16 dias	02/11/2010
	2	0,63 - 0,69				
	3N	0,78 - 0,86				
	3B	0,78 - 0,86				
LISS III	2	0,52 - 0,59	23,5	7 bits	24 dias	02/09/2010
	3	0,62 - 0,68				
	4	0,77 - 0,86				
TM	1	0,45 - 0,52	30	8 bits	16 dias	28/10/2011
	2	0,52 - 0,60				
	3	0,63 - 0,69				
	4	0,76 - 0,90				

Fonte: ASTER (YAMAGUCHI *et al.*, 1998), TM (JENSEN, 2009) e LISS III (JENSEN, 2009).

O sensor *Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer* (ASTER), a bordo do satélite Terra (EOS AM-1), é um instrumento de pesquisa de cooperação entre a *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) e o Ministério de Comércio Internacional e Indústria do Japão (ASTER, 2012). O ASTER é um sensor multiespectral de moderada resolução espacial com três subsistemas operando em diferentes regiões espectrais, denominadas *visível* (VIS), *infravermelho próximo* (IVP), *infravermelho de ondas curtas* (SWIR) e *infravermelho termal* (TIR) (YAMAGUCHI *et al.*, 1998). Uma cena ASTER VIS-IVP cobre uma superfície de 60 x 60 km de área e tem 15 metros de resolução espacial na região do visível e infravermelho próximo.

O sensor *Linear Imaging Self-Scanning Sensor*, terceira versão (LISS III), é um instrumento do tipo *Charge Couple Device* (CCD), que usa tecnologia de arranjo linear para o registro das imagens. A faixa de imageamento do LISS III é de 141 km para as bandas 2, 3 e 4 e de 148 km para a banda do SWIR. As bandas do sensor LISS III são praticamente idênticas às do TM, a bordo do Landsat 5 (JENSEN, 2009).

O Sensor *Thematic Mapper* (TM) é um instrumento óptico mecânico do tipo *whiskbroom*, a bordo dos satélites Landsat 4 e 5, que registra a energia eletromagnética refletida da região do visível, infravermelho próximo e médio do espectro eletromagnético, além da região emitida do termal (JENSEN, 2009). Uma cena do sensor TM cobre uma superfície de 185 x 170 km de área.

Processamento digital das imagens

Nas três cenas adquiridas, foram realizados os seguintes processamentos digitais: transformação radiométrica dos dados, correção atmosférica, geração de índices de vegetação e georreferenciamento.

A transformação radiométrica consistiu na conversão dos números digitais da imagem em radiância aparente ou radiância no topo da atmosfera (MARKHAM; BARKER, 1986). Segundo Ponzoni e Shimabukuro (2010), essa conversão não é igual para cada uma das bandas do sensor, mas é função dos valores máximo e mínimo de radiância de cada um dos detectores (calibração pré-lançamento), específicos em cada um dos intervalos de comprimento de onda ou bandas (CHANDER *et al.*, 2009). Por isso, quando se deseja trabalhar com informações quantitativas oriundas de dados remotos, é necessária sua transformação radiométrica. Entretanto, essa não é a variável física apropriada para a caracterização espectral dos alvos na superfície terrestre, porque é dependente da intensidade de irradiância da fonte (Sol) em determinado comprimento de onda e da geometria de aquisição da imagem (sensor), que envolve o ângulo solar zenital e a distância Sol-Terra – ambos os fatores influenciados pela época do ano de aquisição dos dados (PONZONI; SHIMABUKURO, 2010). Em virtude disso, os valores de radiância no topo da atmosfera foram transformados para fator de reflectância bidirecional aparente (FRB) em cada uma das bandas nos três sistemas sensores, pela seguinte formulação:

$$\rho_a = (\pi \cdot L_{toa}(\lambda) \cdot d^2) / (E_{sun}(\lambda) \cdot \cos\theta)$$

em que: ρ_a = reflectância aparente, adimensional;

$L_{toa}(\lambda)$ = radiância no topo da atmosfera em determinado comprimento de onda, em $\text{mW} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{x} \cdot \text{sr}^{-1}$;

d^2 = distância Sol-Terra, em unidades astronômicas;

$E_{sun}(\lambda)$ = irradiância solar em determinado comprimento de onda, em $\text{mW} \cdot \text{cm}^{-2}$;

θ é o ângulo zenital solar.

Ainda, intrínseco ao valor da FRB aparente, há o efeito da atmosfera sobre os valores registrados pelos sensores, que é distinto para cada data de aquisição, sendo necessário corrigir o efeito atmosférico sobre os valores da FRB aparente (SONG *et al.*, 2001). As imagens foram então convertidas para valores de reflectância de superfície em cada uma das bandas e sensores, a partir do modelo de redução atmosférica por transferência radiativa *Moderate spectral resolution atmospheric transmittance algorithm* (MODTRAN4), implementado na rotina *Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes* (FLAASH) do software ENVI 4.5 (ADLER-GOLDMAN *et al.*, 1999).

Com base nas imagens de reflectância, alguns índices de vegetação (IV) foram gerados. Os IV utilizados neste trabalho estão listados na tabela 2.

Por fim, as imagens *reflectância* foram corregistradas segundo o polígono georreferenciado da Estação Experimental. As unidades amostrais (UA) empregadas na geração das equações de regressão

são, então, correspondentes à dimensão de um pixel da imagem, e os dados biofísicos representam a soma de biomassa e de carbono estocado contidos nos indivíduos georreferenciados dentro desse pixel de resolução.

Tabela 2. Índices de vegetação utilizados no estudo; $\rho_{\text{Verm.}}$, ρ_{Verde} , ρ_{Azul} e ρ_{IVP} são as reflectâncias na região do vermelho, verde, azul e infravermelho próximo do espectro EM, respectivamente.
Table 2. Vegetation indices used in the study; ρ_{Red} , ρ_{Green} , ρ_{Blue} and ρ_{NIR} are the reflectance at the red, green, blue and near infrared spectrum EM, respectively.

Índice vegetação	Fórmula	Referência
SR - Razão Simples	$\rho_{\text{IVP}} / \rho_{\text{Verm.}}$	Birth e McVey (1968)
NDVI - Diferença	$(\rho_{\text{IVP}} - \rho_{\text{Verm.}}) / (\rho_{\text{IVP}} + \rho_{\text{Verm.}})$	Rouse <i>et al.</i> (1974)
TVI - Triangular	$(0,5 (120(\rho_{\text{IVP}} - \rho_{\text{Verde}})) - 200(\rho_{\text{Verm.}} - \rho_{\text{Verde}})) / (\rho_{\text{IVP}} + \rho_{\text{Verm.}} + L)$, onde $L = 5$	Broge e Leblanc (2000)
SAVI - Ajustado ao Solo	$G ((\rho_{\text{IVP}} - \rho_{\text{Verm.}}) / (\rho_{\text{IVP}} + C1 \rho_{\text{Verm.}} + \rho_{\text{Azul}} C2 + L))(1+L)$, onde G, C1, C2 e L têm valores empíricos de 2,5; 6; 7,5 e 1, respectivamente.	Huete (1988)
EVI _{mod} - Realçado modificado ¹		Huete <i>et al.</i> (2002)

(1) A banda de reflectância referente ao comprimento de onda do azul do espectro EM foi substituída pela banda do verde nos três sensores. Fonte: Adaptado de Jensen (2009).

Metodologia

A metodologia do trabalho está resumida no fluxograma da figura 2, cujas etapas foram divididas em três fases distintas e complementares: as correlações entre as variáveis biofísicas e espectrais, a validação dos modelos de regressão e o resultado das estimativas.

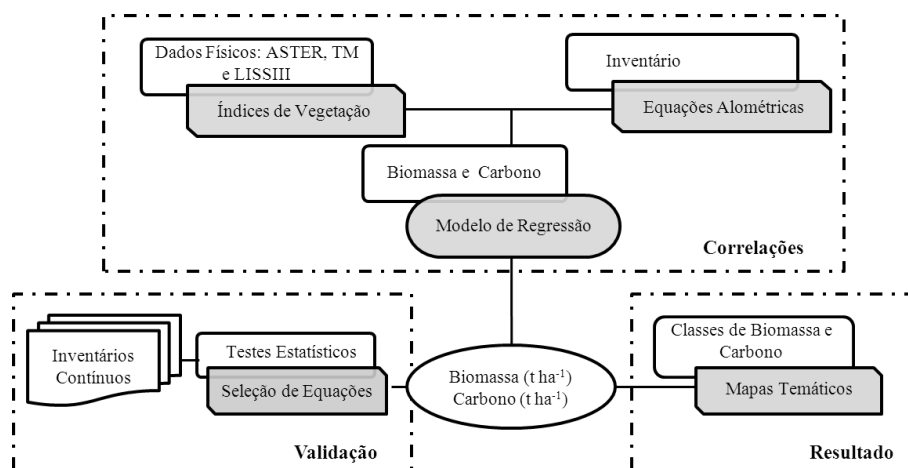


Figura 2. Fluxograma da metodologia empregada.

Figure 2. Methodology flowchart.

O tratamento estatístico inicial envolveu a análise de correlação de Pearson entre os dados de biomassa e carbono florestal (dados biofísicos) e os dados de reflectância das bandas espectrais e índices de vegetação gerados a partir dessas bandas (dados espectrais). A análise de regressão consistiu na estimativa das relações lineares empíricas existentes entre todos os dados espectrais, tratados como variáveis independentes, e as variáveis biofísicas, tratadas como variáveis dependentes. A validação das regressões foi efetuada pelas seguintes estatísticas: coeficiente de determinação (R^2), erro padrão da estimativa (S_{yx}), erro padrão da estimativa relativo ($S_{yx}\%$) e análise dos resíduos da regressão.

A precisão das estimativas de carbono florestal para a Estação Experimental foi testada comparando-se os valores de carbono estimados pelo inventário do PELD, em toneladas por hectare, com os valores de carbono estimados pelas diferentes equações ajustadas nos diferentes sensores. Por fim, quantificou-se o carbono na área de estudo através da equação que melhor descreveu as variações dessa variável.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na tabela 3 são apresentadas as estatísticas encontradas nas UA utilizadas para descrever as variações das variáveis biofísicas a partir das variáveis espectrais, em cada um dos sensores.

Tabela 3. Estatísticas das variáveis biofísicas em kg/m² e das variáveis espectrais nas unidades amostrais, em cada um dos sensores avaliados.

Table 3. Statistics on biophysical variables in kg/m² and spectral variables in sample units on each of the sensors measured.

	N	Máx. - Mín.	Méd.	D.P.	CV %	N	Máx. - Mín.	Méd.	D.P.	CV %	N	Máx. - Mín.	Méd.	D.P.	CV %			
Biomassa	21	19,94	19,58	4,75	24,24	26	23,18	19,77	6,08	30,74	21	22,52	19,17	5,12	26,69			
Carbono	21	8,33	8,10	1,96	24,17	26	9,44	8,18	2,49	30,48	21	9,47	7,94	2,14	26,90			
ρVerde	21	0,01	0,01	0,00 ¹	27,28	26	0,00 ¹	0,03	0,00 ¹	4,19	21	0,01	0,02	0,00 ¹	16,61			
ρVerm.	A	21	0,00 ¹	0,01	0,00 ¹	14,67	L	26	0,01	0,03	0,00 ¹	8,28	21	0,01	0,00 ¹	24,26		
ρIVP	S	21	0,09	0,22	0,02	9,31	I	26	0,05	0,15	0,01	6,50	T	21	0,09	0,18	0,03	15,18
SR	E	21	13,93	32,03	3,68	11,49	S	26	1,40	5,55	0,42	7,63	M	21	105,18	49,88	25,69	51,52
NDVI	R	21	0,03	0,94	0,01	0,74	S	26	0,07	0,69	0,02	2,83		21	0,05	0,96	0,01	1,26
TVI		21	6,04	13,01	1,37	10,56		26	2,10	7,99	0,57	7,11		21	6,12	12,18	1,85	15,16
SAVI		21	0,11	0,44	0,03	6,18		26	0,06	0,27	0,02	5,62		21	0,15	0,38	0,04	11,35
EVI _{mod}		21	0,19	0,81	0,05	6,38		26	0,10	0,40	0,03	6,27		21	0,31	0,66	0,08	12,85

(1) Valores inferiores a duas casas decimais; N: número de unidades amostrais; Méd.: média amostral; D.P.: desvio padrão amostral; CV%: coeficiente de variação, em porcentagem; Biomassa: biomassa florestal acima do solo em quilogramas por metro quadrado; Carbono: carbono florestal em quilogramas por metro quadrado; ρVerde: banda correspondente ao verde do espectro EM; ρVermelho: banda correspondente ao vermelho do espectro EM; ρIVP: banda correspondente ao infravermelho próximo do espectro EM; SR: índice de vegetação razão simples; NDVI: índice de vegetação por diferença normalizada; TVI: índice de vegetação triangular; SAVI: índice de vegetação ajustado ao solo; EVI_{mod}: índice de vegetação melhorado modificado.

Nota-se que as médias nos valores de biomassa e carbono foram semelhantes entre os sensores avaliados. As variáveis espectrais, em contrapartida, apresentaram comportamento bastante distinto, pois os valores médios observados nos índices e bandas de um sensor não foram os mesmos dos demais. O índice EVI_{mod}, por exemplo, tem valor médio de 0,81 no sensor ASTER, 0,40 no sensor LISS III e 0,66 no sensor TM. Em outro exemplo, o índice de razão simples (SR) apresenta coeficiente de variação (CV) de 17,02% no sensor ASTER, apenas 7,63% no sensor LISS e até 51,52% no sensor TM.

O esperado seria que os seus valores fossem muito próximos uns dos outros, já que os números digitais estão em um mesmo parâmetro físico, estão minimizados os efeitos geométricos e atmosféricos nas cenas e a área coberta é a mesma. Essas disparidades observadas nos valores de reflectância das bandas espectrais dos diferentes sensores podem ter duas causas principais: aquelas inerentes às características do sensor (diferentes resoluções espaciais e radiométricas) e os efeitos ambientais durante a aquisição das cenas, que, neste caso, não podem ser controlados. Os baixos CVs das variáveis espectrais do sensor LISS podem decorrer da sua menor resolução radiométrica.

Curran e Hay (1986) enumeram sete fontes de erros nos dados obtidos de sensores ópticos. Entre os erros, as variações na irradiância espectral têm a maior contribuição, podendo chegar a mais ou menos 15% de erro absoluto no valor de radiância registrado pelo sensor TM (CURRAN; HAY, 1986). O erro referente à discretização do sinal é dependente do comprimento de onda, mas este tem pequena ordem de grandeza – mais ou menos 0,3% ou em torno de 1 número digital para o sensor TM (CURRAN; HAY, 1986) e inferior a 0,5% para o sensor ASTER (FUJISADA, 1994). Por isso, diferentes sensores possuem diferentes magnitudes de erros e elas influenciam na resposta espectral da FOM registrada pelos sensores.

Análise de correlação

As correlações entre as variáveis biofísicas e as variáveis espectrais consideradas, nos três sensores avaliados, estão descritas na tabela 4.

O maior coeficiente de correlação de Pearson (*r*) foi encontrado entre a biomassa e o carbono e o índice SR/TM, com valores de 0,77 e 0,78, respectivamente, embora estes tenham o mesmo nível de significância dos coeficientes obtidos pelos índices NDVI, EVI_{mod} e a banda do vermelho com essas variáveis biofísicas.

Para o sensor LISS, a banda do infravermelho, os índices SAVI e EVI_{mod} obtiveram resultados significativos ao nível $\alpha = 0,01$ com as variáveis biofísicas. Barati *et al.* (2011) observaram coeficientes de correlação semelhantes, na ordem de $r = 0,72$ para os seguintes índices de vegetação: SAVI, NDVI, SR e MSAVI, gerados pelo sensor LISS III com as classes de vegetação do Irã central.

Tabela 4. Matriz de correlação entre as variáveis espectrais e biofísicas em cada um dos sensores.

Table 4. Correlation matrix between spectral and biophysical data in each sensor.

	ASTER 30m ³		LISS		TM	
	Biomassa	Carbono	Biomassa	Carbono	Biomassa	Carbono
ρ_{Verde}	0,55 ¹	0,56 ¹	0,05	0,05	0,10	0,10
$\rho_{\text{Verm.}}$	0,16	0,18	0,24	0,24	-0,57 ¹	-0,57 ¹
ρ_{IVP}	0,52 ²	0,52 ²	0,71 ¹	0,72 ¹	0,52 ²	0,51 ²
SR	0,20	0,18	0,36	0,36	0,77 ¹	0,78 ¹
NDVI	0,22	0,20	0,35	0,35	0,67 ¹	0,67 ¹
TVI	0,57 ¹	0,57 ¹	0,57	0,57	0,53 ²	0,53 ²
SAVI	0,52 ²	0,52 ²	0,72 ¹	0,72 ¹	0,53 ²	0,52 ²
EVI _{mod}	0,49 ²	0,49 ²	0,71 ¹	0,71 ¹	0,56 ¹	0,55 ¹

(1) Significativo ao nível $\alpha: 0,01$; (2) Significativo ao nível $\alpha: 0,05$; (3) A resolução espacial do sensor ASTER, originalmente 15 m, foi degradada para 30 m, de modo a ficar na mesma resolução espacial dos demais sensores.

No sensor ASTER, as variáveis significativas ao nível $\alpha = 0,01$ foram a banda do verde e o índice TVI. Usando a mesma banda desse sensor para correlacioná-la com a biomassa na Floresta Boreal, Heiskanen (2006) observou $r = -0,698$, e Muukkonen e Heiskanen (2005), $r = -0,69$, o que difere deste trabalho por se tratar de correlações negativas.

Em um estudo em FOM, Watzlawick (2003) também observou valores negativos de $r = -0,71$ para o índice SR e $r = -0,80$ para a banda espectral MS-4 (ρ_{IVP}) do sensor IKONOS II, com a biomassa florestal, e de $r = -0,69$ e $r = -0,79$ para o índice SR e banda do IVP, respectivamente, com o carbono florestal. No mesmo sentido, foram encontradas correlações negativas entre a banda MS-4 e o NDVI com a biomassa florestal em uma Floresta de Terra Firme na Amazônia (MATOS; KIRCHNER, 2008), porém com baixos coeficientes de correlação entre essas variáveis (-0,061 e -0,07, respectivamente).

Já Bernardes (1998) encontrou $r = -0,82$ entre o índice SAVI, gerado a partir do sensor TM, e a biomassa de uma Floresta Ombrófila Densa, enquanto Maciel (2002) encontrou $r = -0,83$ entre o SAVI e a biomassa, na mesma floresta, utilizando-se do mesmo sensor.

A correlação negativa entre as variáveis biofísicas e espectrais é típica de coníferas (MUUKKONEN; HEISKANEN, 2005), pois, como reportaram alguns autores, as múltiplas camadas de copas e as pequenas superfícies formadas pelas acículas diminuem a reflectância, à proporção que aumenta a estrutura vertical da floresta e o efeito de sombreamento (ÁRDO, 1992; HÁME *et al.*, 1997). Lillesand *et al.* (1994) comentam que as espécies folhosas têm normalmente maiores valores de reflectância tanto na região do infravermelho próximo quanto na região do vermelho, pois apresentam maior variabilidade de pigmentos e estruturas celulares. A dificuldade de avaliar a resposta espectral da FOM encontra-se no fato de ser característica dessa tipologia florestal a coexistência de coníferas e folhosas e, portanto, a resposta espectral ser uma mistura de ambas.

Análise de regressão

Na tabela 5 estão descritas as estatísticas das análises das regressões lineares ($y = \alpha x + \beta$) para o carbono florestal, a partir das variáveis espectrais geradas pelos três sensores. Os resultados da análise da biomassa florestal não são apresentados, por conterem a mesma tendência nos dados.

No sensor ASTER, os maiores valores de R^2 foram encontrados com o índice TVI e a banda do verde, com $R^2 = 0,32$ e $R^2 = 0,31$, respectivamente. Valores de R^2 observados neste estudo são bem inferiores aos valores mínimos e máximos de R^2 encontrados por Heiskanen (2006), de 0,66 a 0,81, para a banda do vermelho e o SR, respectivamente, para prever a biomassa florestal da Finlândia através de regressões lineares simples. Bajracharya (2008), por sua vez, encontrou $R^2 = 0,028$ para a equação de regressão linear entre a biomassa florestal no Nepal e o índice NDVI/ASTER.

Com o sensor LISS, obtiveram-se estatísticas semelhantes às das regressões geradas pela banda do IVP e os índices SAVI e EVI_{mod}. Madugundu *et al.* (2008) observaram $R^2 = 0,63$ entre o NDVI/LISS e a biomassa acima do solo em área florestal no sudoeste da Índia, com valores de biomassa variando de 145 a 350 t.ha⁻¹. Em outro estudo na Índia, Kumar *et al.* (2013) encontraram $R^2 = 0,53$ quando utilizada a

banda do vermelho como preditora da biomassa florestal de uma reserva florestal, com valores de biomassa entre 42 e 431 t.ha⁻¹. Porém o melhor resultado foi com a regressão linear obtida a partir do NDVI/LISS, com $R^2 = 0,7$.

Tabela 5. Resultado da análise de regressão linear entre o carbono florestal e as variáveis espectrais obtidas nos três sensores avaliados.

Table 5. Results of linear regression analysis between forest carbon and spectral variables obtained in the three sensors evaluated.

	ASTER			LISS			TM		
	R^2	Syx (kg)	Syx (%)	R^2	Syx (kg)	Syx (%)	R^2	Syx (kg)	Syx (%)
ρVerde	0,31	1456,00	19,97	0,00	1433,92	30,44	0,01	1912,37	26,77
ρVerm.	0,03	1735,68	23,80	0,06	1392,58	29,56	0,33	1679,76	21,81
ρIVP	0,27	1504,15	20,63	0,51	1003,67	21,30	0,26	1654,76	23,16
SR	0,03	1732,40	23,76	0,13	1341,86	28,48	0,61	1207,46	16,90
NDVI	0,04	1724,84	23,65	0,12	1347,54	28,60	0,45	1429,30	20,01
TVI	0,32	1451,05	19,90	0,32	1184,40	25,14	0,28	1632,49	22,85
SAVI	0,27	1507,61	20,67	0,51	1002,27	21,28	0,27	1638,20	22,93
EVI _{mod}	0,24	1537,53	21,08	0,51	1009,80	21,43	0,31	1601,08	22,41

Para o sensor TM, os maiores R^2 foram obtidos com o uso dos índices SR e NDVI, 0,61 e 0,45, respectivamente. Roy e Ravan (1996) encontraram $R^2 = 0,22$ a 0,46 para estimar a biomassa florestal presente em um Parque Nacional na Índia a partir do NDVI/TM. As diferenças observadas pelos autores são referentes à inclusão ou não de parcelas com predominância de arbustos e pastagens nessa análise. O maior valor observado pelos autores foi obtido quando todas as parcelas foram utilizadas. Reese *et al.* (2002) observaram Syx (%) variando de 58 a 80% utilizando-se o algoritmo de k vizinhos mais próximos (k -NN) para estimar o volume da Floresta Boreal da Suécia, a partir das bandas do sensor TM em nível de pixel.

Análise dos resíduos

Na figura 3 têm-se os resíduos gerados pelas regressões mais significativas em cada um dos sensores, destacadas as unidades amostrais com resíduos superiores a dois desvios-padrão (2σ). Frise-se que uma boa distribuição dos resíduos ocorre quando eles se encontram centrados em zero nos dois eixos ortogonais e 95% desses resíduos estão situados no intervalo $[-2,2]$.

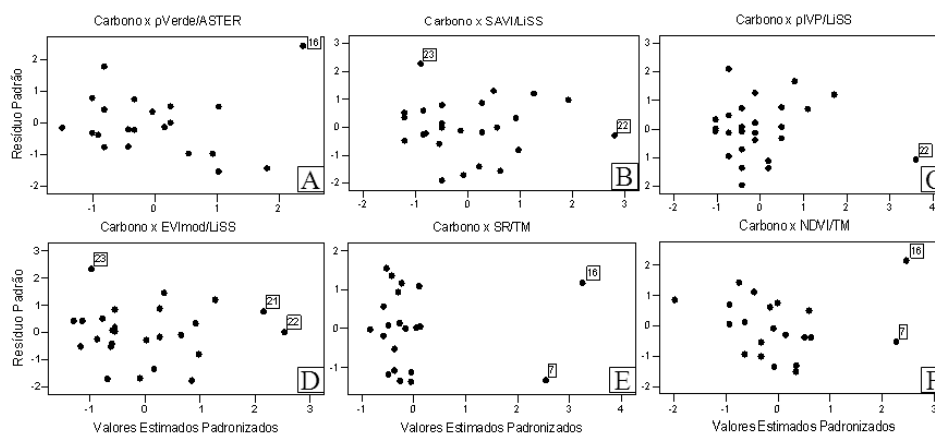


Figura 3. Gráfico de dispersão dos resíduos padronizados das regressões lineares versus os valores estimados padronizados de carbono florestal nos três sensores avaliados: A) banda do verde/ASTER; B) índice SAVI/LiSS; C) banda IVP/LiSS; D) índice EVI_{mod}/LiSS; E) índice SR/TM; F) índice NDVI/TM. As unidades amostrais com resíduos superiores a dois foram destacadas.

Figure 3. Scatter plot of standardized residuals from linear regressions versus standardized estimated values of forest carbon in the three sensors evaluated: A) green band/ASTER; B) SAVI index/LiSS; C) infrared band/LiSS; D) EVI_{mod} index/LiSS; E) SR index/TM; F) NDVI index/TM. The sampling units with more than two residues were highlighted.

Nota-se, pela figura 3, a boa dispersão dos resíduos da regressão gerada a partir da banda do verde do sensor ASTER. No sensor LISS, obteve-se R^2 igual para a banda do IVP e índices SAVI e EVImod. Contudo, a melhor dispersão dos resíduos gerados foi observada utilizando-se a banda do IVP, que apresentou apenas uma UA com resíduo superior a dois, enquanto o SAVI apresentou duas UA e o EVImod, três. Nos resíduos gerados pelas equações de regressão a partir dos índices SR e NDVI/TM nota-se uma clara tendência, com os resíduos se concentrando à esquerda do gráfico. O índice SR do sensor TM, portanto, não deve ser um bom preditor da biomassa florestal, pois há claro viés nos valores estimados.

Validação das regressões

Na tabela 6 são apresentados os resultados das estimativas de carbono florestal, obtidos por meio das regressões lineares, tomando-se as variáveis espectrais (bandas e IVs) como predictoras. Pela tabela 6, verifica-se que as bandas do verde e IVP e os índices TVI e SAVI foram as variáveis espectrais que alcançaram a maior precisão para inventariar o carbono estocado na floresta, com variações inferiores a 1% do valor médio estimado nas parcelas do PELD. No sensor LISS, o melhor resultado alcançado foi com a variável IVP como preditora do carbono florestal, com variação relativa de -0,10%. No sensor TM, a menor variação foi obtida com o uso do NDVI como preditor, variação de 2,31%. Destaca-se o fraco resultado alcançado com o índice SR/TM, apesar do mais alto R^2 observado entre os sensores e índices, devido ao viés observado com os resíduos.

Ressalta-se o alto desempenho das equações de regressões lineares simples em estimar o carbono florestal. As variações foram, em muitos casos, inferiores a 5% do valor estimado pelo PELD, as quais se situam dentro do intervalo de confiança de 95% da maioria das campanhas de inventário florestal que se utilizam do método destrutivo (MATOS; KIRCHNER, 2008).

Tabela 6. Estimativas de carbono florestal por hectare, em $t.ha^{-1}$, a partir das regressões lineares simples. Table 6. Estimates of forest carbon per hectare in $t.ha^{-1}$, generated from linear regressions.

	ASTER			LISS			TM		
	Carbono ($t.ha^{-1}$)	Varição ($t.ha^{-1}$)	Varição (%)	Carbono ($t.ha^{-1}$)	Varição ($t.ha^{-1}$)	Varição (%)	Carbono ($t.ha^{-1}$)	Varição ($t.ha^{-1}$)	Varição (%)
Observada	90,19			90,19			90,93		
ρ Verde	90,15	-0,04	0,04	83,65	-6,53	7,24	82,56	-8,37	9,21
ρ Verm.	84,16	-6,03	6,68	87,94	-2,25	2,50	87,51	-3,42	3,77
ρ IVP	90,01	-0,17	0,19	90,28	0,09	-0,10	94,41	3,48	-3,83
SR	80,30	-9,89	10,97	76,48	-13,71	15,20	79,61	-11,32	12,45
NDVI	79,34	-10,85	12,03	75,59	-14,60	16,19	88,83	-2,10	2,31
TVI	90,34	0,16	-0,17	81,90	-8,28	9,19	96,60	5,67	-6,24
SAVI	89,33	-0,86	0,96	84,03	-6,16	6,83	93,64	2,71	-2,98
EVImod	88,38	-1,81	2,01	81,05	-9,13	10,13	93,34	2,41	-2,65

Inventário de carbono

Com base nas estatísticas da análise de regressão e na validação das estimativas, realizou-se o inventário do estoque de carbono para a área experimental de São João do Triunfo com a seguinte equação linear gerada a partir da banda de reflectância do verde do sensor ASTER:

$$C = 464106. \rho\text{Verde}/\text{ASTER} + 3672,9$$

em que: C = toneladas de carbono;

ρ Verde = reflectância correspondente à região do verde do espectro eletromagnético do sensor ASTER, adimensional.

Foi estimado, para os 32,48 hectares de Floresta Ombrófila Mista da Estação Experimental de São João do Triunfo (EESJT), um estoque de 2920,78 t.C ou 10709,63 t.CO₂.

CONCLUSÕES

- Foi possível inventariar o carbono estocado na Floresta Ombrófila Mista por detecção remota através de sensores de média resolução espacial, alcançando erros por hectare inferiores a 1%, o que representa um resultado bastante satisfatório.

- As equações lineares que obtiveram os maiores coeficientes de determinação não foram necessariamente as que apresentaram a melhor estimativa do estoque de carbono. O índice SR/TM obteve $R^2 = 0,78$ para prever o carbono florestal, mas variação na estimativa superior a 12%, além de clara tendência nos resíduos gerados pelas estimativas.
- O melhor resultado foi observado com o uso da banda do verde do sensor ASTER como preditora do carbono florestal, devido ao resultado estatístico satisfatório e, especialmente, pela baixa variação de carbono por hectare quando comparada com a do inventário do PELD.
- Apesar da menor resolução radiométrica, o sensor LISS apresentou resultados semelhantes aos obtidos pelos sensores ASTER e TM.
- A metodologia se mostrou apropriada para inventários de carbono com vistas à utilização em projetos de REDD⁺, no que concerne a monitoramento, relatório e verificação de estoques de carbono em florestas.

AGRADECIMENTOS

Ao Programa de Pesquisas Ecológicas de Longa Duração (PELD) Sítio 9 - Floresta com Araucária e suas transições, pelos dados de campo, e ao CNPq, pela concessão da bolsa de mestrado ao primeiro autor.

REFERÊNCIAS

ADLER-GOLDEN, S. M.; MATTHEW, M. W.; BERNSTEIN, L. S.; LEVINE, R. Y.; BERK, A.; RICHTSMEIER, S. C.; ACHARYA, P. K.; ANDERSON, G. P.; FELDE, G.; GARDNER, J.; HOKE, M.; JEONG, L. S.; PUKALL, B.; MELLO, J.; RATKOWSKI, A.; BURKE, H. H. Atmospheric Correction for Short-wave Spectral Imagery Based on MODTRAN4. In: SPIE Proceedings on Imaging Spectrometry, v. 3753, 1999, Denver. **Anais do...**, Denver, 1999, p. 61 - 69.

ADVANCED SPACEBORNE THERMAL AND REFLECTION RADIOMETER (ASTER). **ASTER Mission**. Disponível em: <<http://asterweb.jpl.nasa.gov/mission.asp>>. Acesso em: 08/10/2012.

ÄRDO, J. Volume quantification of coniferous forest compartments using spectral radiance recorded by Landsat Thematic Mapper. **International Journal of Remote Sensing**, London, v. 13. p. 1779 - 1786, 1992.

BACCINI, A.; FRIEDL, M. A.; WOODCOCK, C. E.; WARBINGTON, R. Forest biomass estimation over regional scales using multisource data. **Geophysical Research Letters**, Malden, v. 31. p. 1 - 4, 2004.

BAJRACHARYA, S. **Community carbon forestry: remote sensing of forest carbon and forest degradation in Nepal**. 92 f. Master of Science (Master of Geo-Information Science and Earth Observation for Environmental Modelling and Management) – International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation Enschede, The Netherlands, 2008.

BARATI, S.; RAYEGANI, B.; SAAATI, M.; SHARIFI, A.; NASRI, M. Comparison the accuracies of different spectral indices for estimation of vegetation cover fraction in sparse vegetated areas. **The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences**, Cairo, v. 14, p. 49 - 56, 2011.

BERNARDES, S. **Índices de vegetação e valores de proporção na caracterização de floresta tropical primária e estádios sucessionais na área de influência da Floresta Nacional de Tapajós - Estado do Pará**. 86 f. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1998.

BIRTH, G. S.; MCVEY, G. Measuring the color of growing turf with reflectance spectrophotometer. **Agronomy Journal**, Madison, v. 60, p. 640 - 643, 1968.

BROGE, N. H.; LEBLANC, E. Comparing prediction power and stability of broadband and hyperspectral vegetation indices for estimation of green leaf area index and canopy chlorophyll density. **Remote Sensing of Environment**, Philadelphia, v. 76, p. 156 - 172, 2000.

BUSCH, J.; STRASSBURG, B.; CATTANEO, A.; LUBOWSKI, R.; BRUNER, A.; RICE, R.; CREED, A.; ASHTON, R.; BOLTZ, F. Comparing climate and cost impacts of reference levels of reducing emissions from deforestation. **Environmental Research Letters**, Bristol, v. 4, n. 4, p. 1 - 11, 2009.

CHANDER, G.; MARKHAM, B. L.; HELDER, D. L. Summary of Current Radiometric Calibration Coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI Sensors. **Remote Sensing of Environment**, Philadelphia, v. 113, p. 893 - 903, 2009.

CURRAN, P. J.; HAY, A. M. The importance of measurement error for certain procedures in remote sensing at optical wavelengths. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, Maryland, v. 52, n. 2, p. 229 - 241, 1986.

DURIGAN, M. E. **Florística, dinâmica e análise proteica de uma Floresta Ombrófila Mista em São João do Triunfo**. 138 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1999.

FUJISADA, H. Overview of ASTER instrument on EOS-AM1 platform. In: SPIE Proceedings on Imaging Spectrometry, v. 2268, 1994, San Diego. **Anais do...**, San Diego, 1994, p. 14 - 36.

GOETZ, S.; BACCINI, A.; LAPORTE, N.; JOHNS, T.; WALKER, W.; KELLNDORFER, J.; HOUGHTON, R.; SUN, M. Mapping and monitoring carbon stocks with satellite observations: A comparison of methods. **Carbon Balance and Management**, London, v. 4, n. 2, p. 1 - 7, 2009.

HÄME, T.; SALLI, A.; ANDERSSON, K.; LOHI, A. A new methodology for estimation of biomass of conifer-dominated boreal forest using NOAA AVHRR data. **International Journal of Remote Sensing**, London, v. 18, p. 3211 - 3243, 1997.

HARRIS, N.; BROWN, S.; HAGEN, S. C.; SAATCHI, S. S.; PETROVA, S.; SALAS, W.; HANSEN, M. C.; PETAPOV, P. V.; LOTSCH, A. Baseline map of carbon emissions from deforestation in tropical regions. **Science**, Hanover, v. 336, p. 1573 - 1575, 2012.

HEISKANEN, J. Estimating aboveground tree biomass and leaf area index in a mountain birch forest using ASTER satellite data. **International Journal of Remote Sensing**, London, v. 27, n. 6, p. 1135 - 1138, 2006.

HOUGHTON, R. A.; SKOLE, D. L.; NOBRE, C. A.; HACKLER, J. L.; LAWRENCE, K. T.; CHOMENTOWSKI, W. H. Annual fluxes of carbon from deforestation and regrowth in the Brazilian Amazon. **Nature**, London, v. 403, p. 301 - 304, 2000.

HUETE, A. R. A Soil-Adjusted Vegetation Index (SAVI). **Remote Sensing of Environment**, Philadelphia, v. 25, p. 295 - 309, 1988.

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

INSTITUTO AGRÔNOMICO DO PARANÁ (IAPAR). CAVIGLIONE, J. H.; KIIHL, L. R. B.; CARAMORI, P. H.; OLIVEIRA, D. **Cartas climáticas do Paraná**. Londrina: IAPAR, 2000. CD Londrina, PR. Cartas Climáticas. Disponível em: <<http://www.iapar.br/modules/conteudo/conteudo.php?conteudo=677>>. Acesso em: 03/04/2013.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Manual técnico da vegetação brasileira**. Rio de Janeiro, 1992. 92 p. (Manuais Técnicos em Geociências, 1).

JENSEN, J. R. **Sensoriamento remoto do ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres**. Tradução: EIPHANIO, J. C. N.; FORMAGGIO, A. F.; SANTOS, A. R.; RUDORFF, B. F. F.; ALMEIDA, C. M. A.; GALVÃO, L. S. São José dos Campos: Parêntese. 2009. 2 ed. 672 p.

KUMAR, P.; SHARMA, L. K.; PANDEY, P. C.; SINHA, S.; NATHAWAT, M. S. Geospatial strategy for tropical forest-wildlife reserve biomass estimation. **IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing**, Washington, v. 6, n. 2, p. 917 - 923, 2013.

LILLESAND, T. M.; KIEFER, R. W.; CHIPMAN, J. **Remote sensing and interpretation**. New York: John Wiley, 1994. 6 ed. 804 p.

MACIEL, M. N. M. **Estimativa de parâmetros estruturais de uma floresta primária na Amazônia Oriental através de dados orbitais**. 144 f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2002.

MADUGUNDU, R.; NIZALAPUR, V.; JHA, C. S. Estimation of LAI and above-ground biomass in deciduous forests: Western Ghats of Karnataka, India. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, Amsterdam, v. 10, p. 211 - 219, 2008.

- MARKHAM, B. L.; BARKER, J. L. Landsat MSS and TM post-calibration dynamic ranges, exoatmospheric reflectances and at-satellite temperature. Greenbelt: Nasa/Goddard Space Flight Center, n. 1, 8 p, 1986. (EOSAT Landsat Technical Notes).
- MATOS, F. D. A.; KIRCHNER, F. F. Estimativa de biomassa da floresta ombrófila densa de terra firme na Amazônia central com o satélite Ikonos II. **Floresta**, v. 38, n. 1, p. 157 - 171, 2008.
- MINISTÉRIO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA (MCT). **Primeiro Inventário Brasileiro de Emissões Antrópicas de Gases de Efeito Estufa**. Brasília. 2004. 86 p. Disponível em: <http://www.mct.gov.br/upd_blob/0004/4199.pdf>. Acesso em: 08/10/2012.
- MUUKKONEN, P.; HEISKANEN, J. Estimating biomass for boreal forests using ASTER satellite data combined with standwise forest inventory data. **Remote sensing of Environment**, Philadelphia, v. 99, p. 434 - 447, 2005.
- PARKER, C.; MITCHELL, A.; TRIVEDI, M.; MARDAS, N. The Little REDD Book. Oxford: Global Canopy Foundation, 2008. 112 p.
- PONZONI, F. J.; SHIMABUKURO, Y. E. **Sensoriamento remoto aplicado ao estudo da vegetação**. São José Dos Campos: Parêntese, 2010. 135 p.
- PROJETO DE CONSERVAÇÃO E UTILIZAÇÃO SUSTENTÁVEL DA DIVERSIDADE BIOLÓGICA BRASILEIRA (PROBIO). **Levantamento da Cobertura Vegetal Nativa do Bioma Mata Atlântica**, Rio de Janeiro: IESB - IGEO/UFRJ, 2007. 84 p.
- QURESHI, A.; PARIVA; BADOLA, R.; HUSSAIN, S. A. A review of protocols used for assessment of carbon stock in forested landscapes. **Environmental Science & Pollution**, Amsterdam, v. 16, p. 81 - 89, 2012.
- RATUCHNE, L. C. **Ajuste e Seleção de Equações Alométricas para a Estimativa de Biomassa, Carbono e Nutrientes em uma Floresta Ombrófila Mista**. 102 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – UNICENTRO, Guarapuava, 2010.
- REESE, H.; NILSSON, M.; SANDSTROM, P.; OLSSON, H. Applications using estimates of forest parameters derived from satellite and forest inventory data. **Computers and Electronics in Agriculture**, London, v. 37, p. 37 - 55, 2002.
- ROUSE, J. W.; HAAS, R. H.; SCHELL, J. A.; DEERING, D. W. Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS. In: Third Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium, Greenbelt, 1974. **Anais do...** Greenbelt: Nasa SP-351, p. 3010 - 3017.
- ROY, P. S.; RAVAN, S. A. Biomass estimation using satellite remote sensing data - An investigation on possible approaches for natural forest. **Journal of Biosciences**, Bangalore, v. 21, n. 4, p. 535 - 561, 1996.
- SAATCHI, S. S.; HARRIS, N. L.; BROWN, S.; LEFSKY, M.; MITCHARD, E. T. A.; SALAS, W.; ZUTTA, B.; BUERMANN, W.; LEWIS, S. L.; HAGEN, S.; PETROVA, S.; WHITE, L.; SILMAN, M.; MOREL, A. Benchmark map of forest carbon stocks in tropical regions across three continents. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, Washington, v. 108, p. 9899 - 9904, 2011.
- SONG, C.; WOODCOCK, C. E.; SETO, K. C.; PAX-LENNEY, M.; MACOMBER, S. A. Classification and change detection using Landsat TM data: when and how to correct atmospheric effects? **Remote sensing of environment**, Philadelphia, v. 75, p. 230 - 244, 2001.
- VELOSO, R. B.; RANGEL FILHO, A. L. R.; LIMA, J. C. A. **Classificação da vegetação brasileira, adaptada a um sistema universal**. Rio de Janeiro: IBGE. 1991, 124 p.
- WATZLAWICK, L. F. **Estimativa de biomassa e carbono em Floresta Ombrófila Mista e plantações florestais a partir de dados de imagens de satélite IKONOS II**. 120 f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2003.
- WATZLAWICK, L. F.; BALBINOT, R.; SANQUETTA, C. R.; CALDEIRA, M. V. W. Teores de carbono em espécies da Floresta Ombrófila Mista. In: SANQUETTA, C. R.; BALBINOT, R.; ZILIO, M. A. B. **Fixação de carbono: atualidades, projetos e pesquisas**. Curitiba: AM Impressos, 2004, p. 95 - 109.
- YAMAGUCHI, Y.; KAHLE, A. B.; TSU, H.; KAWAKAMI, T.; PNIEL, M. Overview of Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER). **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, Washington, v. 36, n. 4, p. 1062 - 1071, 1998.