

Comparação dos sensores ASTER e TM para a estimativa de biomassa e carbono em uma Floresta Ombrófila Mista

Henrique Luis Godinho Cassol ¹

Dejanira Luderitz Saldanha ¹

Tatiana Mora Kuplich ²

¹ Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS
Av. Bento Gonçalves, 9500, Campus do Vale, Agronomia – Porto Alegre, RS
Caixa Postal: 15044, CEP: 91501-970;
hlcassol@hotmail.com; dejanira.saldanha@ufrgs.br

² Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE
Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais
Caixa Postal 5021, CEP 97105970;
tmk@dsr.inpe.br

Abstract. The aim of this work was to estimate forest biomass and carbon stock using three different sensor data: ASTER and TM. Some vegetation indexes were used, such as SR, NDVI, SAVI, TVI and EVI, relating these spectral indexes with forest biomass values observed in field work through linear regression analysis. The study area is located on Ombrophilous Forest, central region of Paraná state, with 32.48 hectares, where the local forest growth is annually monitored. Some statistics analyses were used to evaluate the best regression model such as coefficient of determination, standard error and the relative variation of biomass. The results indicate that NDVI provided by TM sensor as a vegetation index is the more suitable to predict forest biomass by linear regression. The coefficient of determination from regression (R^2) was almost 0.5 whereas the relative biomass variation, per hectare, was only 1.25%. Different nonlinear regressions were tested to study the relation between biomass and remote sensing data; however, these regressions were less suitable than the others and moreover difficult to explain your relationship with the biomass change. The carbon stock was estimated multiplying the conversion factor 0.45 for each ton of biomass. The total carbon stock to this present study in 32.48 ha was 3.571,2 ton or 108,3 ton.ha⁻¹.

Key-words: Forest biomass, carbon stock, forestry, remote sensing, biomassa florestal, estoque de carbono, sensoriamento remoto, análise de regressão.

1. Introdução

Preocupações ambientais com relação ao desaparecimento de florestas, tem levado à busca por soluções que atendam não somente à redução de desmatamento e da emissão de gases de efeito estufa – GEE, como também às medições do carbono estocado pelas diferentes tipologias florestais. Segundo Houghton (1994), as florestas cobrem cerca de 30% da superfície terrestre e fixam o montante de 85% do carbono orgânico disponível na atmosfera.

No entanto, o carbono orgânico não pode ser mensurado diretamente, pois é um elemento constituinte da vegetação. Neste sentido, a biomassa é a medida biofísica mais acessível aos pesquisadores da área florestal para a estimativa da quantidade de gases de efeito estufa “estocados” pela floresta, pois esta pode ser facilmente convertida em carbono orgânico, sabendo-se a concentração média de carbono presente na biomassa florestal. A concentração de carbono orgânico encontrada por Higuchi e Carvalho Jr (1994) na vegetação arbórea tropical está em torno de 48%, variando de 46 a 52%. Por isso, o IPCC (2003), convencionou o valor de 50% de carbono para cada tonelada de biomassa, quando necessária sua estimativa em projetos de estoques de carbono. Porém, estimativas de biomassa não são facilmente obtidas e, na maioria das vezes, não são realizadas diretamente (Silveira *et al.*, 2008).

A biomassa florestal, segundo Sanquetta (2002), pode ser obtida por meio de dois métodos básicos, que são: (i) método direto ou destrutivo, quando os vegetais são cortados e

pesados ou (ii) método indireto quando são empregadas equações alométricas, estabelecidas com base em dados advindos do método direto. Para Higuchi e Carvalho Jr (1994), a estimativa de biomassa florestal gerada pelo método indireto consiste em correlacioná-la com alguma variável de fácil obtenção, tal como o diâmetro a altura do peito - DAP, a altura das árvores ou dados de sensoriamento remoto. O método indireto possui uma aplicação imediata, mas restrita, pois conforme Salati, (1994); Koehler *et al.*, (2005) somente possui aplicação adequada nas áreas e tipologias florestais para as quais foi criada. Este, portanto, é um dos motivos pelos quais sua aplicação ainda não foi sistematizada para grandes áreas florestais.

Sendo assim, o uso imagens obtidas de plataformas orbitais pode ser usado de forma complementar para aprimorar as técnicas de estimativa de biomassa a campo, quando aplicadas em extensas áreas cobertas por florestas. O objetivo deste trabalho foi o de avaliar a aplicabilidade de dados de dois diferentes sensores para estimar a biomassa florestal e o carbono estocado de um fragmento de Floresta Ombrófila Mista, a partir de índices de vegetação e de dados provenientes de inventário *in situ*.

2. Área de estudo

A área de estudo compreende um fragmento de Floresta Ombrófila Mista, objeto de estudo do Programa Ecológico de Longa Duração – PELD, sítio 9, localizado em São João do Triunfo, estado do Paraná, com as coordenadas centrais 25°41'20''S e 50°09'45''W (Fig. 1).

O local tem 32,48 hectares de área, onde, desta, estão inseridas quatro parcelas permanentes do programa PELD, com um hectare cada (100m x 100m). Estas parcelas foram objeto de estudo deste trabalho. As parcelas também são objeto de estudo de crescimento e acompanhamento da Floresta Ombrófila Mista e, por isso, as circunferências acima do peito – CAP das árvores são medidas, continuamente, desde 1995.

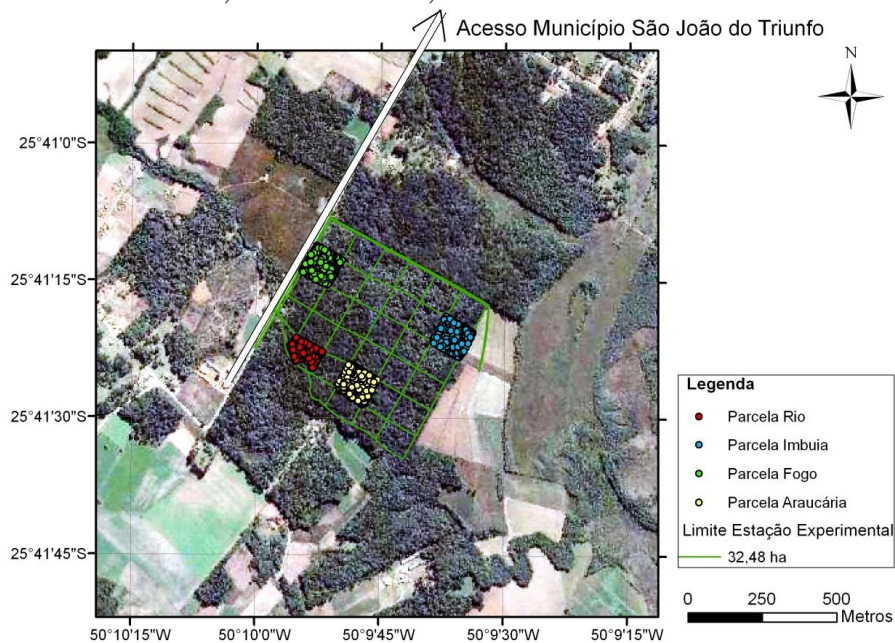


Figura 1 – Localização espacial da área, bem como as parcelas permanentes do PELD.

Para Leite e Kleiton (1990), a Floresta Ombrófila Mista possui esta denominação por ser uma floresta úmida, com chuvas distribuídas uniformemente ao longo do ano, (do grego, ombros = chuva) e mista, pois alude a coexistência de coníferas e folhosas no dossel, caracterizada, predominantemente, pelas espécies *Araucaria angustifolia* e *Ocotea porosa*, respectivamente.

2.1. Biomassa Florestal

A biomassa florestal foi estimada a partir da fórmula desenvolvida por Ratuchne (2010) e ajustada por Mognon (2011) em uma Floresta Ombrófila Mista Montana, que possui características vegetais similares às encontradas neste estudo. A equação alométrica a seguir, foi utilizada para estimar a biomassa florestal, a partir dos DAPs medidos e das alturas estimadas.

$$P = -3,025 \times DAP + 0,425 \times DAP^2 + 0,006 \times (DAP^2 \times h) \quad (1)$$

Onde:

P = biomassa, em kg;

DAP = Diâmetro à Altura do Peito, em cm;

h = altura, em metros.

As alturas foram estimadas mediante as equações hipsométricas desenvolvidas por Pizzato (1999) para a mesma área de estudo, sendo uma equação específica para a *Araucária angustifolia* e a outra para as demais espécies.

2.2. Imagens Sensoriamento Remoto

Duas cenas, uma de cada sensor ASTER – *Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer* e TM – *Thematic Mapper*, foram utilizadas. As características das imagens estão descritas na Tabela 1 (Jensen, 1999). Pode-se notar que os sensores possuem características bastante similares fazendo com que índices de vegetação gerados, a partir das bandas espectrais destes sensores, sejam passíveis de comparação.

Tabela 1: Características básicas dos sensores utilizados.

Características	Sensor		
	ASTER	TM	
Resolução Espacial	30m*	30m	
Resolução Espectral	Verde	0,52 - 0,60 μm	0,50 - 0,60 μm
	Vermelho	0,63 - 0,69 μm	0,63 - 0,69 μm
	Infravermelho Próximo	0,78 - 0,86 μm	0,76 - 0,90 μm
Resolução Temporal	16 dias	16 dias	
Resolução Radiométrica	8 bits	8 bits	
Data de Aquisição	2/11/2010	28/10/2011	

*A resolução espacial do sensor ASTER, originalmente 15m, foi degradada para 30m, detalhes na seção de métodos abaixo.

2.3. Metodologia

A resolução espacial do sensor ASTER, originalmente 15m, foi degradada para 30m – mesma resolução espacial do sensor TM. Segundo Cassol *et al.*, (2012), avaliando diferentes escalas (resoluções espaciais, ou *up-scaling*) do sensor ASTER, 15m, 30m e 45m, para estimar a biomassa florestal desta mesma área de estudo, encontraram maiores correlações entre a biomassa florestal e os índices de vegetação quando o pixel continha 30 x 30m.

Vale destacar que, em decorrência da incidência de nuvens na cena TM, não foi possível a utilização de uma imagem para o mesmo ano de 2010, como feito com o ASTER, logo, a biomassa florestal utilizada para a comparação foi a biomassa estimada para o ano de 2011.

As imagens foram então convertidas para valores de reflectância de superfície, em cada uma das bandas e cenas, a partir do modelo de redução atmosférica por transferência radiativa MODTRAN4 (Adler-Goldman *et al.*, 1999) da rotina *Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes* – FLAASH, ENVI©. Assim, foram gerados os seguintes índices de vegetação, baseados, em sua fórmula, no uso das bandas do verde, vermelho e infravermelho da região óptica do espectro eletromagnético (Jensen, 1999): SR (*Simple Ratio*), NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*), TVI (*Triangular Vegetation Index*), SAVI (*Soil Adjusted Vegetation Index*) e EVI mod¹ (*Enhanced Vegetation Index*). Estes índices foram gerados para os dados dos diferentes sensores e utilizados para testar suas relações com a biomassa florestal observada.

Os IV, em cada pixel, foram correlacionados com a biomassa florestal estimada dentro da respectiva área do pixel (900m²). As quatro parcelas do PELD foram utilizadas para gerar as estimativas dos valores de biomassa, sorteando-se aleatoriamente 18 pixels na cena ASTER e 22 na cena TM. Estas diferenças de amostragens são decorrentes do georreferenciamento e da degradação espacial do sensor ASTER, que agruparam áreas que não possuíam características de florestas e, portanto, foram excluídos da análise.

3. Resultados e Discussões

Na Tabela 2 estão descritas as estatísticas das variáveis das parcelas amostrais obtidas para cada um dos sensores avaliados, bem como das amplitudes e desvios dos IVs.

Tabela 2: Números de amostras em cada um dos sensores e suas estatísticas básicas. A biomassa é referente à biomassa florestal estimada dentro da área de cada pixel.

Sensor		Biomassa (kg)	SR	NDVI	TVI	SAVI	EVI mod
ASTER	N	18	18	18	18	18	18
	Mín	11165,77	20,25	0,91	10,62	0,39	0,70
	Máx	30157,54	39,18	0,95	16,27	0,50	0,93
	Média	16565,40	31,72	0,94	12,90	0,44	0,80
	Desvio	4756,42	4,53	0,01	1,39	0,03	0,06
TM	N	22	22	22	22	22	22
	Mín	11931,00	28,21	0,93	10,19	0,33	0,56
	Máx	32200,11	133,39	0,99	16,31	0,48	0,87
	Média	16966,10	50,29	0,96	12,12	0,38	0,66
	Desvio	4841,23	26,95	0,01	1,88	0,04	0,09

Nota-se que os sensores têm comportamento semelhante no que se refere às estatísticas dos índices. Exceção do índice SR que apresentou uma grande amplitude e alto desvio-padrão para o sensor TM.

Na Tabela 3 estão descritas as análises das regressões lineares entre os IVs e a biomassa florestal. A variável biomassa (variável dependente) e os IV (variável independente), gerados pelo sensor ASTER, foi fracamente correlacionada. Houve relação linear só entre o SR e o NDVI e a biomassa florestal. Cassol *et al.*, (2012) em um estudo similar, utilizando-se deste

¹ A banda de reflectância da região correspondente ao azul foi substituída pela do verde.

sensor para prever valores de biomassa florestal, a partir dos mesmos IVs avaliados, encontraram valores de R^2 de 0,28 e 0,27 para regressões geradas pelo NDVI e SR, respectivamente. As relações lineares mais fortemente descritas (alto coeficiente de determinação - R^2 e baixo erro padrão relativo - Syx %) para o sensor ASTER e TM foram encontradas nos índices SR e NDVI ($R^2 = 0,19$, $R^2 = 0,15$, $R^2 = 0,59$ e $R^2 = 0,48$, respectivamente).

Tabela 3 – Comparação dos resultados das regressões lineares entre os IVs e a biomassa observada para os sensores estudados.

Índice	ASTER			Landsat 5 TM		
	^a R^2	^b Syx	^c Syx(%)	R^2	Syx	Syx(%)
SR	0,19	4418,88	26,68	0,59	3190,88	18,81
NDVI	0,15	4526,24	27,32	0,48	3592,14	21,17
TVI	0,05	4780,37	28,86	0,37	3964,49	23,37
SAVI	0,05	4767,83	28,78	0,35	4009,64	23,63
EVI	0,07	4726,63	28,53	0,38	3923,05	23,12

^a $R^2 = SQ_{regressão}/SQ_{total}$, onde $SQ_{regressão} = SQ_{total} - SQ_{resíduos}$; $SQ_{total} = \sum (y_i - y_{med})^2$; $SQ_{resíduos} = \sum (y_i - \hat{y})^2$; y_i = valores observados; y_{med} = média dos valores observados; \hat{y} = valores estimados pela equação;

^b $Syx = \sqrt{SQ_{resíduos}/(n-p)}$, onde n = número de observações e p = número de coeficientes da equação;

^c $Syx(\%) = (Syx/\hat{y}) \cdot 100$, onde Syx = erro padrão da estimativa (resíduo).

Na Figura 2, têm-se os valores de biomassa, em tonelada por hectare, estimados pelas equações lineares propostas no estudo. Do gráfico se pode inferir que as estimativas de biomassa, por hectare, encontradas pelas equações lineares geradas, a partir dos índices de vegetação do sensor TM, foram as que se encontram mais próximas do valor real observado pela média das parcelas do PELD. Este valor observado provém da média das quatro parcelas permanentes do PELD que foi de 217,57 ton.ha⁻¹ no ano de 2010 e de 219,32 ton.ha⁻¹ em 2011 (Tab. 4).

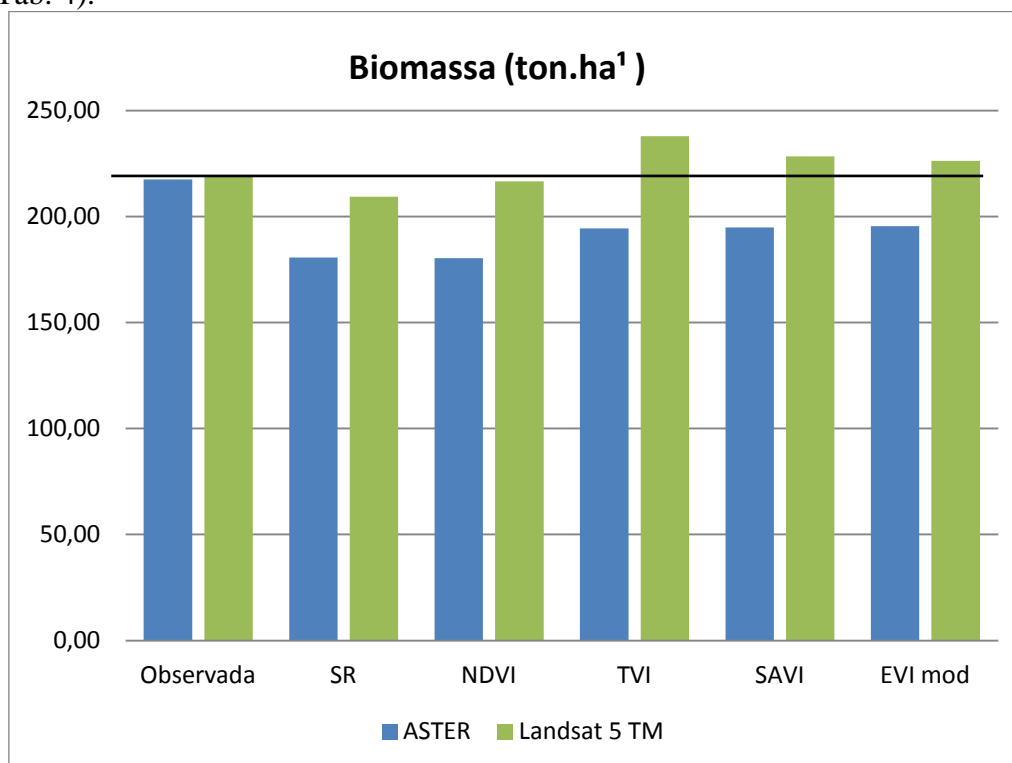


Figura 2 – Comparação entre a biomassa observada e a biomassa estimada pelos IVs gerados a partir de dados de diferentes sensores.

Mognon (2011) encontrou $185,75 \text{ ton.ha}^{-1}$ em uma Floresta Ombrófila Mista no município de General Carneiro, em 2009, enquanto que Watzlawick (2003) observou $250,9 \text{ ton.ha}^{-1}$ na mesma floresta, porém, para no ano de 2001. Semelhante valor de biomassa foi encontrado por Weber *et al.*, (2005), na mesma área deste estudo, com $252,38 \text{ ton.ha}^{-1}$, em 2005. Porém, estes autores utilizaram apenas uma parcela do PELD, a que apresenta, justamente, o maior valor de biomassa por hectare.

Pela Tabela 4 é possível avaliar as variações entre os valores de biomassa estimados, pelas regressões lineares dos índices de vegetação, e os valores de biomassa observados, por hectare, encontrados no inventário contínuo (PELD).

O NDVI e o EVImod, gerados a partir dos dados do sensor TM, foram os índices mais indicados, embora este tenha superestimado e aquele subestimado a biomassa florestal por hectare. A variação relativa entre a biomassa observada e a estimada pela regressão linear com a variável dependente NDVI foi de apenas 1,25%. Com relação ao sensor ASTER, as variações relativas de biomassa foram superiores a 10% em todos os índices avaliados, subestimando os valores de biomassa florestal por hectare observado pelo inventário.

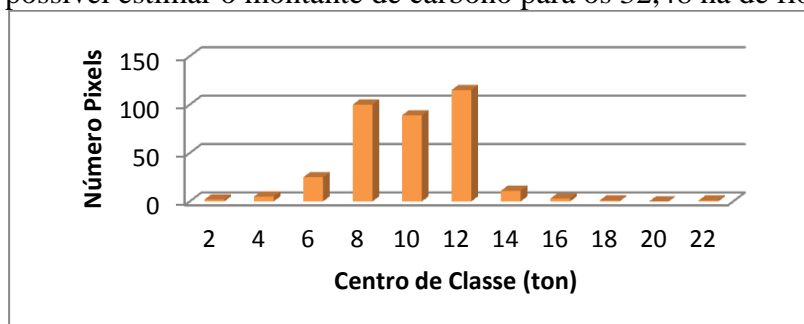
Tabela 4 – Estimativas de biomassa por hectare geradas por meio das regressões lineares simples.

Índice	ASTER			TM		
	Biomassa (ton.ha ¹)	Variação (ton)	Variação (%)	Biomassa (ton.ha ¹)	Variação (ton)	Variação (%)
Observada	217,57			219,32		
SR	180,70	-36,8754	16,95	209,42	-9,8994	4,51
NDVI	180,34	-37,2354	17,11	216,58	-2,7474	1,25
TVI	194,49	-23,0852	10,61	237,90	18,5798	-8,47
SAVI	194,84	-22,7317	10,45	228,38	9,0583	-4,13
EVI mod	195,50	-22,0743	10,15	226,32	6,9942	-3,19

3.1. Estoque de Carbono

Segundo Sanquetta (2002), o conhecimento dos teores de carbono presente na floresta é de suma importância para se quantificar o estoque de carbono, quando estimados a partir dos valores de biomassa florestal. Porém, os teores de carbono presentes na floresta possuem ampla variabilidade entre espécies e dentre as mesmas, pois os teores são distintos para a madeira, galhos, casca e raízes (Rezende *et al.*, 2002). No entanto, devido à dificuldade de obtenção destes teores para todas as espécies e partes das árvores, convencionou-se a utilização de fatores de conversão de biomassa seca em carbono orgânico.

Watzlawick (2003), estudando a concentração de carbono na biomassa arbórea em uma Floresta Ombrófila Mista Montana, encontrou teores entre 39% a 51% de carbono, com média equivalente a 45% de teor médio de carbono para este tipo de floresta. Partindo-se deste teor médio de 45% de carbono, para cada unidade de biomassa, na floresta em questão, foi possível estimar o montante de carbono para os 32,48 ha de floresta.



Carbono (ton)	
N	361
Mín.	1,35
Máx.	22,12
Média	9,26
Soma	3517,20
Desvio P.	4,01

Figura 3 – Distribuição das frequências em toneladas de carbono por pixel.

A biomassa utilizada foi àquela obtida pela regressão linear do sensor TM, tendo como variável dependente o NDVI ($y = - 239043 + 267987 \cdot \text{NDVI}$). O carbono total foi de 3.517,2 toneladas, com $108,3 \text{ ton} \cdot \text{ha}^{-1}$ e média de 9,26 toneladas por pixel (Fig. 3 e 4).

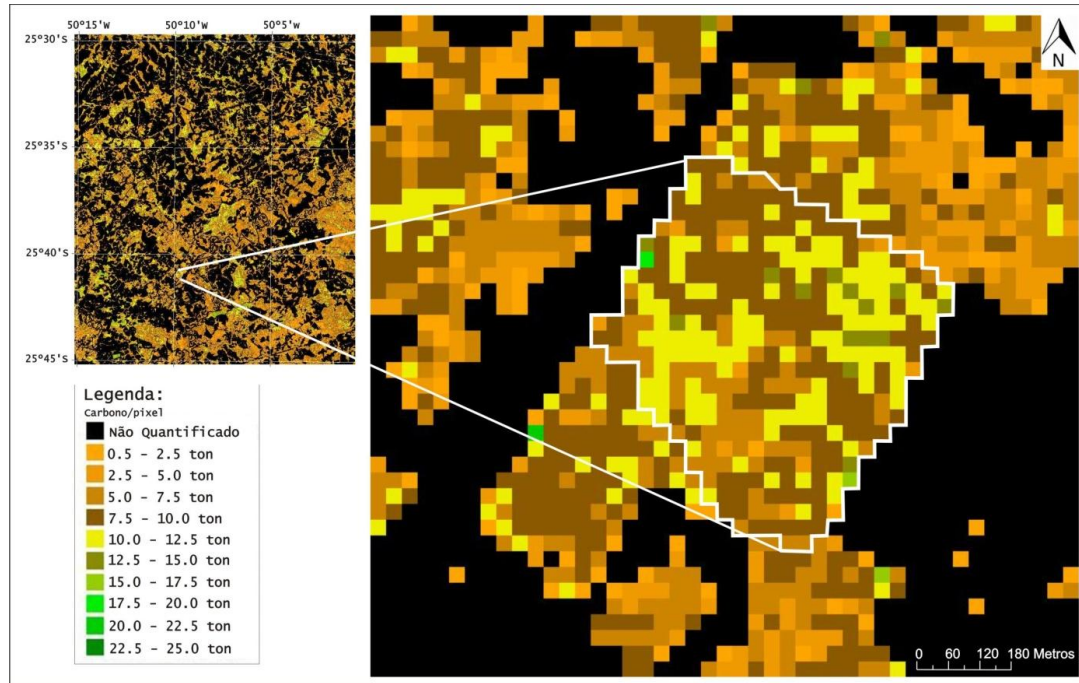


Figura 4 – Toneladas de carbono, por pixel, estimadas para a área de estudo.

4. Conclusões

Conclui-se que existe uma relação linear entre os índices de vegetação gerados pelos diferentes sensores e a biomassa estimada através de dados a campo. O índice NDVI, gerado a partir dos dados do sensor TM, foi o que apresentou melhor resultado, com $R^2 = 0,48$; $Sy\% = 21,17$ e variação de 1,25% no valor de biomassa por hectare. Os sensores ASTER apresentou resultado inferior ao do sensor TM.

Agradecimentos

Ao Programa Ecológico de Longa Duração PELD/CNPQ (Site 9): Araucária, pelos dados de inventário fornecidos. O primeiro Autor agradece à Capes pela concessão de Bolsa de Mestrado.

Referências Bibliográficas

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. *SPIE Proceedings on Imaging Spectrometry*, v. 3753, p. 61-69, 1999.

Cassol, H. L. G.; Saldanha, D. L.; Kuplich, T. M. Estimando biomassa florestal com dados ASTER: A questão da escala. In: X Seminário de Atualização em Sensoriamento Remoto e Sistema de Informações Geográficas aplicados à Engenharia Florestal, 2012. *Anais...* Curitiba: X SENGEF, 2012. p. 642-650.

Leite, P. F.; Klein, R. M. Vegetação. In: Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Geografia do Brasil. v.2. Região Sul**. Rio de Janeiro: IBGE, p.113-150, 1990.

Higuchi, N.; Carvalho Júnior, J. A. Fitomassa e conteúdo de carbono de espécies arbóreas da Amazônia. In: Seminário Emissão x Sequestro de CO₂ – Uma Nova Oportunidade de Negócios para o Brasil, 1994, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: CVRD, 1994. p. 125-145.

Houghton, R. A. As florestas e o ciclo de carbono global: armazenamento e emissões atuais. In: Seminário Emissão x Sequestro de CO₂ – Uma Nova Oportunidade de Negócios para o Brasil, 1994, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: CURD, 1994. p. 38-76.

Jansen, J. R. **Sensoriamento remoto do ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres**. Tradução de José Carlos Neves Epiphanyo (coordenador), *et al.*. São José dos Campos, SP: Parêntese, 2009. 604p.

Koehler, H. S.; Watzlawick, L. F.; Kirchner, F. F.; Valerio, A. F. Fontes de Erros nas Estimativas de Biomassa e Carbono Fixado na Floresta Ombrófila Mista. **Revista Biomassa & Energia**, v. 2, n. 1, p. 68-77, 2005.

Mognon, F. **Dinâmica do estoque de carbono como serviço ambiental prestado por um fragmento de floresta Ombrófila Mista Montana localizada no sul do estado do Paraná**. 2011. 104f. Dissertação. (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba. 2011.

Pizatto, W. **Avaliação biométrica da estrutura e da dinâmica de uma Floresta Ombrófila Mista em São João do Triunfo – PR: 1995 a 1998**. 1999. 172f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba. 1999.

Rezende, D.; Merlin, S.; Santos, M. T. **Sequestro de carbono: uma experiência concreta**. Ed. Gráfica Terra. Palmas: Instituto Ecológica, 2001. 2ªEd. 178p.

Ratuchne, L. C. **Ajuste e Seleção de Equações Alométricas para a Estimativa de Biomassa, Carbono e Nutrientes em uma Floresta Ombrófila Mista**. 102f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Setor de Ciências Agrárias, UNICENTRO/PR, Guarapuava, 2010.

Salati, E. Sumário Executivo. In: Seminário Emissão x Sequestro de CO₂ – Uma Nova Oportunidade de Negócios para o Brasil, 1994, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: p.13-37, 1994.

Sanquetta, C. R. Métodos de determinação de biomassa florestal. In: Sanquetta, C. R. Watzlawick, L. F.; Balbinot, R.; Ziliotto, M. A. B; Gomes, F. S. (Eds.). **As florestas e o carbono**. Curitiba: [s.n.], 2002, p. 119-140.

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**. 120f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2003.

Weber, K. S.; Sanquetta, C. R.; Eisfeld, R. L. Variação volumétrica e distribuição espacial do estoque de carbono em Floresta Ombrófila Mista. **Revista Acadêmica Ciências Agrárias e Ambientais**. Curitiba, v.3, n.2, p. 77-85, 2005.