

Videografia digital na estimativa de carbono em florestas implantadas com espécies nativas

Estimation of carbon in forests established with native species using digital videography

Hilton Thadeu Zarate do Couto¹
Guilherme do Couto Justo²
Jefferson Lordelo Polizel³
Demóstenes Ferreira da Silva Filho⁴

Resumo

O objetivo do presente trabalho é utilizar a videografia digital como ferramenta para a estimativa do carbono em florestas implantadas com essências nativas, utilizando para isso o índice de vegetação NDVI. As imagens aéreas foram obtidas com o auxílio de uma aeronave modelo Cessna 180, equipada com o sistema de rastreamento e armazenamento de dados, que inclui uma câmera digital multiespectral de alta resolução. A partir das imagens geradas pelo sistema foi analisado o índice de vegetação ou NDVI do mosaico formado e a idade, em anos, dos plantios estudados, correlacionando os valores do índice e da idade com dados de biomassa total, biomassa do tronco (DAP maior que 5cm)) carbono e CO₂-equivalente obtidos a partir de medições de DAP realizadas em parcelas permanentes instaladas nas áreas florestais inventariadas. Os modelos obtidos foram gerados utilizando-se da análise de regressão linear múltipla. Os resultados obtidos apresentaram coeficientes de determinação (R²) e nível de significância adequado para os modelos que relacionam o NDVI e a idade com as variáveis de biomassa e carbono nas

1 Laboratório de Métodos Quantitativos, ESALQ/USP, Av. Pádua Dias, 11, 13.418-900, Piracicaba, São Paulo, Brasil; e-mail: ¹ htzcouto@esalq.usp.br

2 ESALQ, Graduando em Gestão Ambiental, Av. Pádua Dias, 11, 13.418-900, Piracicaba, São Paulo, Brasil; E-MAIL: gcjusto@esalq.usp.br

3 Laboratório de Métodos Quantitativos, ESALQ/USP, Av. Pádua Dias, 11, 13.418-900, Piracicaba, São Paulo, Brasil; e-mail: ¹ htzcouto@esalq.usp.br

4 Laboratório de Métodos Quantitativos, ESALQ/USP, Av. Pádua Dias, 11, 13.418-900, Piracicaba, São Paulo, Brasil; e-mail: ¹ htzcouto@esalq.usp.br

florestas, mostrando que a videografia digital pode ser uma importante ferramenta na análise e estimativa de biomassa e carbono em florestas implantadas com essências nativas.

Palavras-chave: sensoriamento remoto; videografia digital; floresta nativa; carbono.

Abstract

The aim of the present study is to use high definition digital videography as a tool to estimate biomass and carbon in reforestations planted with native essences, using for it the vegetation index NDVI and age as independent variables. The aerial imagery were obtained with the aid of an aircraft Cessna 180 model, equipped with a tracking and storage data system, that includes a high definition digital multispectral camera. From the images generated by the system was examined the vegetation index (NDVI) of the formed mosaic and the age, in years, of the studied plantations, correlating the values of the index and age with data from total aerial biomass, biomass of the over bark bole (DAP higher than 5cm), total aerial carbon and CO₂-equivalent obtained from measurements of DAP held on permanent plots installed in the forest. The analysis were performed using statistical modeling multiple linear regression. The obtained results showed coefficients of determination (R²) and adequate levels of significance between the NDVI and age with the biomass and carbon variables, showing that the digital videography can be an important tool in the analysis and estimation of carbon in implanted native forests.

Key words: remote sensing; digital videography; native forest; carbon.

Introdução

Em uma escala global, mudanças na cobertura florestal tem-se tornado historicamente, importantes fontes naturais de dióxido de carbono (CO₂) – o principal gás agravador do efeito estufa – para a atmosfera (HOUGHTON, 2003). As florestas sofrem perturbações de natureza antrópica e natural, incluindo colheita, pós-colheita e degradação,

queimadas em larga escala, ataque de pragas e doenças e a conversão do solo em usos não florestais, como agricultura e pastagens (BROWN, 2002). Esta conversão em usos não florestais teve como consequência, no Estado de São Paulo, a redução a apenas 11% a área de vegetação nativa do estado (KRONKA et al., 1993).

Esses distúrbios geralmente transformam as florestas em fontes de CO₂,

pois a produção primária de carbono da floresta é excedida pela respiração total ou a oxidação das plantas, solo e matéria orgânica morta. (BROWN, 2002)

Contudo, os ecossistemas florestais representam um dos quatro reservatórios de carbono existentes no ciclo global do carbono, que compreende ainda os estoques fósseis, a atmosfera e os oceanos (SCHIMMEL, 1995). O crescimento de ecossistemas florestais cria importantes reservatórios de carbono atmosférico. A fotossíntese remove o CO₂ da atmosfera e esse carbono acumulado é incorporado no crescimento dos tecidos vegetais – acúmulo de biomassa – ou é respirado de volta à atmosfera (BARTLETT et al., 1990).

Esses ecossistemas armazenam o carbono que absorvem da atmosfera em cinco reservatórios distintos: na biomassa abaixo da terra, na biomassa acima da terra, na madeira morta, na serapilheira e na matéria orgânica do solo (IPCC, 2006). O trabalho em questão levará em consideração para as estimativas somente a biomassa acima da terra.

Sendo assim o presente trabalho tem como objetivo analisar o valor do índice NDVI gerado pela reflectância da vegetação das áreas degradadas implantadas com espécies nativas no Campus da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Essa reflectância será captada com o auxílio da câmera digital multiespectral Geospatial MS-4100. Analisando estatisticamente os valores do índice NDVI gerado, estudaremos modelos de regressão para estimar a biomassa total, a biomassa do tronco com casca, o carbono total e o CO₂ total da floresta implantada em função da idade dos plantios e do valor do índice obtido

nas fotografias aéreas, sendo possível comprovar, ou não, a correlação existente entre o valor do índice NDVI e o nível de carbono estocado em florestas nativas.

Sensoriamento Remoto e suas Aplicações no Meio Ambiente

Segundo Campbell (2002), sensoriamento remoto é a ciência que obtém informações da superfície terrestre a partir de imagens obtidas a distância. A obtenção dessas informações geralmente depende da energia eletromagnética refletida ou emitida pelos alvos de interesse.

Quando um alvo de interesse é atingido por um fluxo de Radiação Eletromagnética (REM) três fenômenos podem ocorrer: parte do fluxo é refletido; parte penetra no objeto sendo progressivamente absorvido; e parte consegue atravessá-lo. Assim são características do objeto a reflectância, absorvância e transmitância respectivamente, ou seja, cada objeto possui sua assinatura espectral (NOVO, 1992).

Essa reflectância dos alvos é captada dentro de um espectro eletromagnético que compreende o ultravioleta, comprimento de onda de 400nm a 1nm; o espectro visível (RGB), comprimento de onda de 700nm a 400nm; e o infravermelho, comprimento de onda de 1 mm a 700nm. Segundo Novo (1992) os sistemas sensores são responsáveis por transformar qualquer forma de energia em sinal passível de ser convertido em informação sobre ambiente. No caso específico do sensoriamento remoto a energia utilizada é a radiação eletromagnética.

Dentro do sensoriamento remoto, a videografia aérea é uma técnica que vem

sendo utilizada há décadas com o objetivo de monitorar áreas agrícolas (NIXON, 1985). O sistema consiste na utilização de uma ou mais câmeras de vídeo, acopladas ao piso de uma aeronave, de forma a obter imagens verticais, ou seja, paralelas ao solo (POMPERMAYER NETO e COUTO, 2003).

Essas imagens de vídeo obtidas ainda podem gerar dados digitais e índices de vegetação para estimar a altura do dossel de plantas, área foliar, produtividade e biomassa (WIEGAND et al., 1994).

Mudanças na cobertura da vegetação são medidas utilizando o NDVI (Índice de Vegetação por Diferença Normalizada), que se aproveita das diferenças das respostas espectrais da clorofila armazenada nos tecidos vegetais, que são captadas pelos canais do vermelho e infravermelho próximo, presentes na câmera. Quanto maior o valor do NDVI, mais densa será a vegetação verde (JARLAN et al., 2008).

O índice NDVI é obtido através da combinação entre as imagens obtidas na banda do Vermelho e do Infravermelho próximo, explicado pela fórmula 1.

$$(1) \text{NDVI} = \frac{\text{IVP} - \text{V}}{\text{IVP} + \text{V}},$$

onde,

IVP = infravermelho próximo

V = vermelho.

Os avanços tecnológicos na área de videografia permitiram que câmeras de vídeo comerciais fossem utilizadas como ferramentas de sensoriamento remoto. Esse avanço resultou no desenvolvimento de diversos sistemas multispectrais de

sensoriamento remoto. Os primeiros sistemas eram baseados nas câmeras analógicas tipo tubo que mais tarde se desenvolveram para os modelos CCD digitais (NEALE e CROWTHER, 1994).

Segundo BROWN (2002), dados do sensoriamento remoto fornecem meios muito úteis na mensuração de estoques de carbono florestais, e uma série de tecnologias de coleta de dados de forma remota já estão disponíveis, como as imagens aéreas advindas de aeronaves voando a baixas altitudes.

Materiais e Métodos

O presente trabalho foi conduzido em área pertencente à Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” da Universidade de São Paulo (ESALQ-USP) localizada em Piracicaba – SP (22° 42’30”S, 47° 38’00”W) sendo a altitude de 550m. A cobertura vegetal dominante na região é a Floresta Estacional Semidecidual (IBGE, 2008); o termo estacional expressa o diferente comportamento e aspecto da comunidade de acordo com a estação do ano (ACIESP, 1997).

Para a execução do projeto, primeiramente foram instaladas nas áreas de preservação permanente (APP) do Campus “Luiz de Queiroz”, parcelas de monitoramento embasado na metodologia de amostragem sistemática e usando parcelas permanentes.

O tamanho dessas parcelas foi definido de acordo com o espaçamento do plantio – 3 x 2 metros – levando-se em consideração 3 linhas de plantio com 10 indivíduos cada linha, totalizando dentro dos limites da parcela trinta indivíduos; de cada indivíduo foi amostrado o

DAP (1,30m) e a altura total. Para o estudo proposto amostraram-se somente indivíduos com $DAP \geq 5\text{cm}$. As parcelas foram delimitadas com o auxílio de uma trena e estacas nos vértices.

O número de parcelas (unidades amostrais) selecionadas foi de 35 e os seguintes critérios foram utilizados (Tabela 1):

- As áreas menores que 1 hectare tiveram uma distribuição sistemática de três parcelas, indicando uma amostragem não tendenciosa;

como dados comparativos os dados das bases do CIAGRI/USP – Piracicaba – SP e da Santiago e Cintra – Rio Claro – SP, utilizando para tal correção o programa GPS Pathfinder Office 3.10.

Após o processamento dos pontos foi realizado o sobrevôo das áreas de interesse para o projeto a bordo de uma aeronave modelo Cessna 180 e equipada com o sistema *TerraHawk™ Aerial Imaging System*, produzido pela TerraVerde Technologies e que leva consigo a câmera digital multispectral

Tabela 1. Distribuição das parcelas conforme tamanho da área

Nome	Área (ha)	nº de Parcelas
Genética Nova	1	3
Genética Velha	1,28	3
Carvoaria	0,46	3
Brasil 500 anos	0,14	3
Bixos	0,56	3
Lagoa	0,18	3
Sertãozinho	0,78	3
Usina	11	11
Abacaxi	0,7	3

- As áreas maiores que 1 hectare tiveram uma distribuição sistemática, seguindo uma disposição por fileira de parcelas ao longo da área, totalizando uma parcela por hectare.

Juntamente com a delimitação e instalação das parcelas, cada uma delas foi georreferenciada com o auxílio de um Receptor GPS Pathfinder® ProXT™ com bluetooth integrado para precisão superior a um metro e foram coletados no centro de cada parcela vinte pontos de coordenadas. Após a coleta dos pontos os mesmos sofreram uma correção diferencial pós-processada, utilizando

de alta resolução Geospatial MS-4100. O sistema é uma unidade portátil que pode ser acoplada dentro da aeronave com um buraco específico na fuselagem ou pode ser acoplada em um suporte externo para câmeras. O sistema possui acoplado na parte externa um painel de LCD, onde é carregado o plano de vôo a ser realizado; possui também um mecanismo de correção para oscilações que a aeronave possa sofrer durante o plano de vôo; essas correções são realizadas pelo GPS e mantêm a câmera sempre na posição vertical. O modelo Geospatial MS-4100 possui três

sensores CCD. O CCD é um sensor para gravação de imagens formadas por um circuito integrado contendo uma série de capacitores acoplados. A separação ótica das cores trabalha em concerto com os sensores CCD, maximizando a resolução e o campo de visão. A câmera possui três configurações espectrais: RGB (para imagens coloridas de alta resolução), CIR (infravermelho colorido para aplicações multiespectrais) e a RGB/CIR (GEOSPATIAL SYSTEMS INC. MS-410; TERRA VERDE).

As fotografias captadas pela câmera foram importadas para o SIG TNTmips® onde foram montados os mosaicos fotográficos das áreas de interesse; também com o auxílio do TNTmips® geraram-se os mapas do índice de vegetação NDVI.

Gerados os mapas NDVI, ainda com auxílio do SIG, descarregou-se o arquivo dos pontos coletados nas parcelas por cima do mapa gerado, através da sobreposição dos pontos foi possível a mensuração do índice para cada parcela. Para quantificar o valor do índice NDVI, realizou-se a média do valor do índice em quatro pontos ao redor do centro da parcela, e adotou-se como valor

representativo do índice para a parcela a média do valor obtido nesses quatro pontos.

Com os dados levantados no inventário das parcelas estimou-se – através da utilização de equações (método não destrutivo) – a quantidade de biomassa total, a biomassa do tronco, o carbono total incorporado e quantidade de CO₂-equivalente em cada parcela; esses dados serviram como base para as análises estatísticas de regressão entre os valores do mapa do índice NDVI e do inventário florestal. As análises estatísticas de regressão foram realizadas com o auxílio do software estatístico SAS®.

Os dados obtidos, tanto através do inventário quanto dos valores de NDVI, passaram por uma análise de regressão linear múltipla onde foi possível analisar qual o modelo de regressão explicaria melhor a relação entre os valores de biomassa e carbono e os valores de NDVI; ainda dentro da análise inseriu-se outra variável preditora, a idade, em anos, dos plantios (Tabela 2). O principal objetivo dos modelos de regressão é modelar o relacionamento entre diversas variáveis preditoras e uma variável resposta; este relacionamento pode ser por uma equação linear ou uma função não linear.

Tabela 2. Áreas amostradas e suas idades

Nome da Área	Idade (anos)
Genética Nova	3
Genética Velha	5
Carvoaria	2
Brasil 500 anos	8
Bixos	5
Lagoa	3
Sertãozinho	5
Usina	3
Abacaxi	4

Na análise de regressão foi possível determinar quais modelos melhor se ajustavam às quatro variáveis resposta estudadas sendo elas, a biomassa total, a biomassa do tronco, o carbono total e CO₂-equivalente. A escolha do melhor modelo foi feita a partir do valor do coeficiente de determinação (R²), a análise de probabilidade e o quadrado médio do resíduo, esses valores são indicadores do grau de relacionamento entre uma variável e outra; a análise de regressão gerou ainda uma equação matemática que descreve essa relação.

Resultados e Discussão

O resultado da análise estatística mostrou alta correlação entre as variáveis preditoras NDVI e Idade (anos) e as variáveis resposta Biomassa Total em Mg.ha-1 (BTOT), Biomassa do Tronco com Casca em Mg.ha-1 (BTRO), Carbono Total em Mg.ha-1 (CTOT) e CO₂-equivalente (CO₂E) em Mg.ha-1. O teste F dos modelos estudados apresentaram probabilidades menores que 0,0001 para todas as variáveis envolvidas na análise, indicando o alto grau de significância dos modelos (Tabela3).

Outro parâmetro utilizado para analisar a qualidade dos modelos foi o Quadrado Médio do Resíduo (QMR), que apresentou para as variáveis BTRO,

BTOT, CTOT e CO₂E os valores 0,48242, 0,54466, 0,31759 e 0,58680 respectivamente (Tabela 3). O valor do QMR é considerado um importante indicador da qualidade do modelo, e quanto mais próximo de zero estiver, melhor ajustado está o modelo.

O coeficiente de determinação (R²), um dos indicadores mais importantes de uma análise de regressão, indica entre uma escala de 0 a 1 o grau de correlação existente entre variáveis preditoras e uma resposta, quanto mais próximo de 1, maior a correlação entre as variáveis. Para os modelos gerados o valor de R² para BTRO, BTOT, CTOT e CO₂-equivalente, foram 0,8440, 0,8410, 0,8519 e 0,8391 respectivamente (Figura 1, Figura 2, Figura 3 e Figura 4). Juntamente com as figuras seguem as equações geradas para cada um dos quatro modelos.

Conclusão

Existe alto grau de correlação entre as variáveis Biomassa do tronco com casca (BTRO), Biomassa Total (BTOT), Carbono Total (CTOT) e CO₂-equivalente (CO₂E) com as variáveis NDVI e Idade. Sendo assim, o estudo comprova a eficácia de técnicas de videografia na estimativa de carbono em florestas implantadas, utilizando para isso, índices de vegetação.

Tabela 3. Variáveis resposta e os valores de probabilidade e QMR

Variáveis Resposta	Probabilidade (Pr> F)	QMR
BTRO	<0,0001	0,48242
BTOT	<0,0001	0,54466
CTOT	<0,0001	0,31759
CO ₂	<0,0001	0,58680

Figura 1. Modelo de estimativa da biomassa do tronco com casca em relação ao índice NDVI

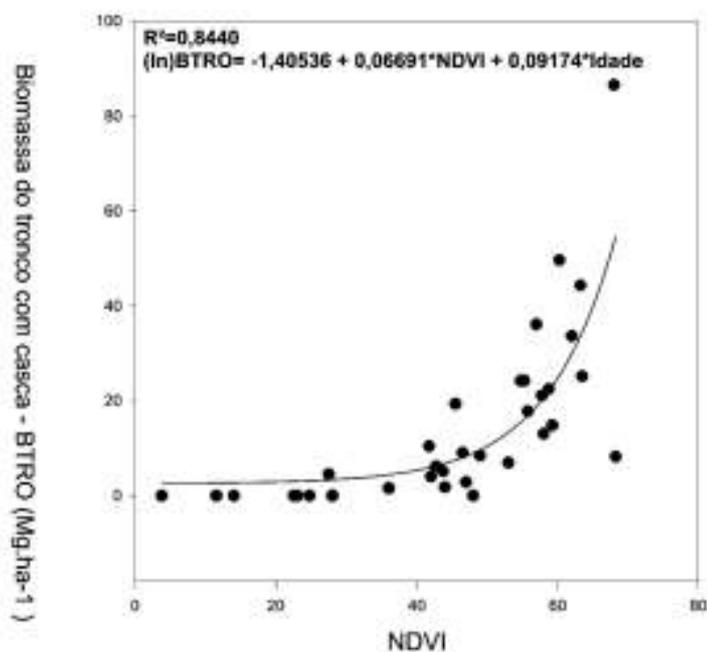


Figura 2. Modelo de estimativa da biomassa total em relação ao índice NDVI

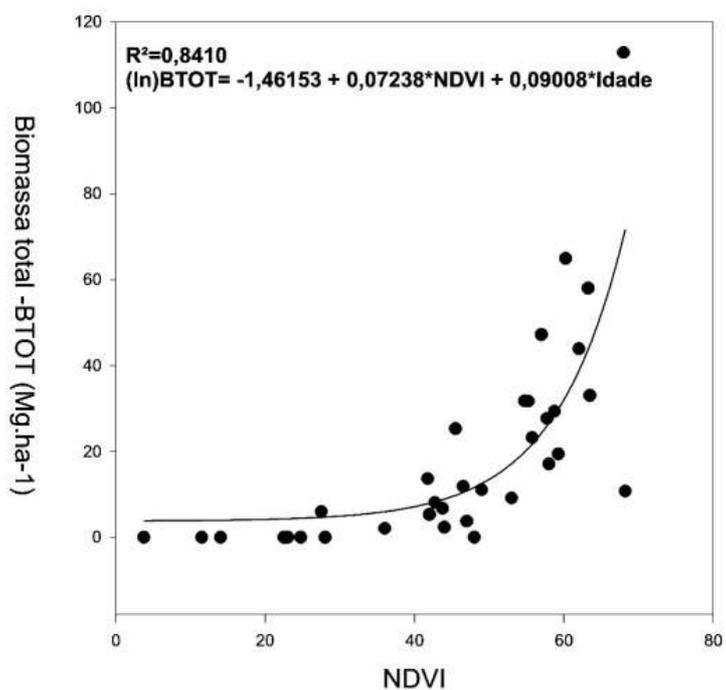


Figura 3. Modelo de estimativa do carbono total da floresta em relação ao índice NDVI

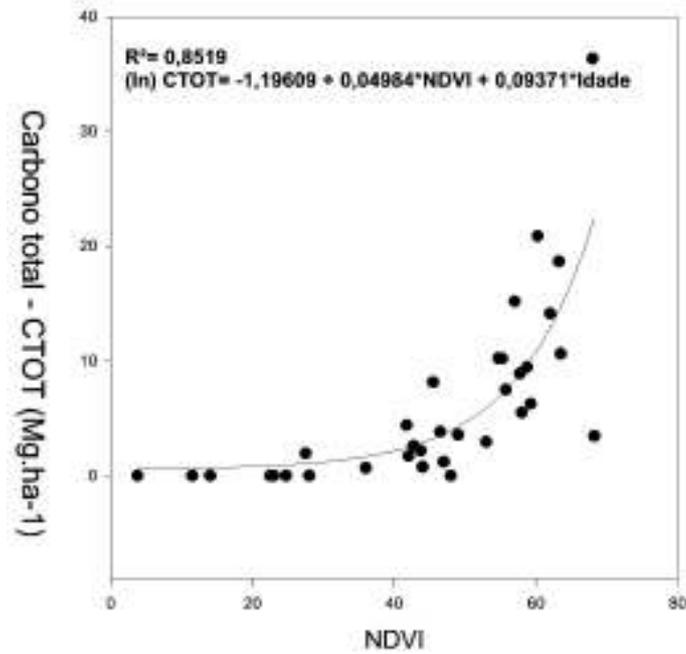
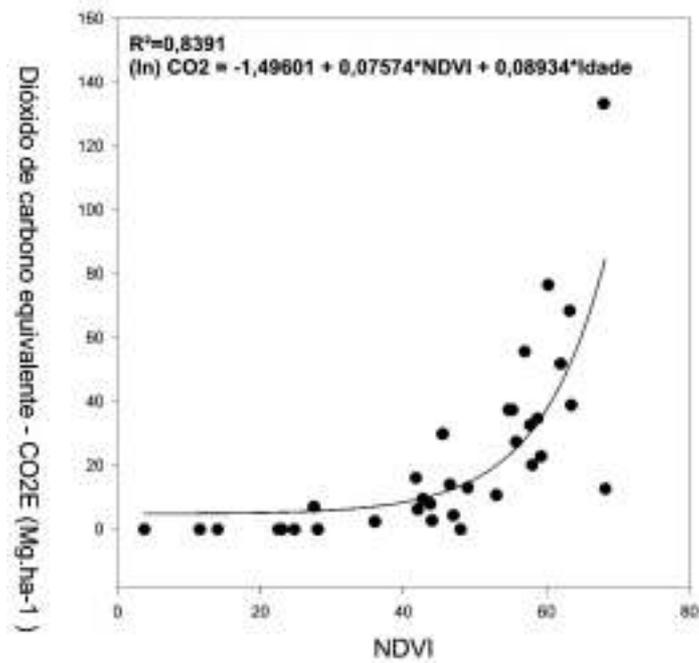


Figura 4. Modelo de estimativa do dióxido de carbono equivalente (CO₂E) absorvido em relação ao índice NDVI



Desta forma, o presente trabalho é de relevância significativa para o tema, visto que foi realizado para um bioma brasileiro, onde existe uma escassez de trabalhos relacionados; a possibilidade da utilização de técnicas de sensoriamento remoto a fim de avaliar e monitorar recursos florestais como reservatório de carbono no contexto do Protocolo de Kyoto é muito atual, tendo em vista a necessidade de países do Anexo-1 em fomentar o desenvolvimento de novas

metodologias para redução ou mitigação de suas emissões (GONZÁLEZ, 2006).

Portanto, a possibilidade do acompanhamento do desenvolvimento de florestas, absorção de carbono pelas mesmas e quantificação de biomassa, fazem do estudo de técnicas de videografia para monitoramento ambiental um campo vasto a ser estudado, na medida em que a obtenção das informações e estimativa é feita através de métodos não destrutivos.

Referências

ACIESP-ACADEMIA DE CIÊNCIAS DO ESTADO DE SÃO PAULO. *Glossário de ecologia*. São Paulo: ACIESP, CNPq, FAPESP, Secretaria de Ciência e Tecnologia, 2 ed., p. 352, 1997.

BARTLETT, D. S. et al. Use of vegetation indices to estimate intercepted solar radiation and net carbon dioxide exchange of a grass canopy. *Remote Sensing of Environment*, v. 30, issue 2, p. 115-128, 1989.

BROWN, S. Measuring carbon in forests: current status and future challenges. *Environmental Pollution*, v. 116, issue 3, p. 363-372, 2002.

CAMPBELL, J. B. Foundation. In: CAMPBELL, J. B. *Introduction to Remote Sensing*. Editora: Guilford Press, 2002. Cap. 1, p. 4.

GEOSPATIAL SYSTEMS INC. MS-4100 - Multispectral HDTV 3CCD Color / CIR Câmera. Disponível em: <<http://www.geospatialsystems.com/imaging-products/kcm-cameras/ms-4100>>. Acesso em: 26 mar., 2008.

GONZÁLEZ, A. F. et al. Forest biomass estimation through NDVI composites. The role of remotely sensed data to assess Spanish forests as carbon sinks. *International Journal of Remote Sensing*, v. 27, n. 24, p. 5409-5415, 2006.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Mapa de Vegetação do Brasil. Disponível em <<ftp://geofp.ibge.gov.br/mapas/tematicos/vegetacao.pdf>> Acesso em: 03 abr., 2008.

IPCC. Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Forest Lands, cap 4. p. 30, 2007. Disponível em: <<http://www.ipcc.ch/ipccreports/methodology-reports.htm>>. Acesso em: 20 mar., 2008.

- JARLAN, L. et al. Assimilation of SPOT/VEGETATION NDVI data into a sahelian vegetation dynamics model. *Remote Sensing of Environment*, v. 112. issue 4, p.1381-1394, 2008.
- KRONKA, F. J. N. et al. Inventário florestal do Estado de São Paulo, p.1-199, 1993.
- NEALE, C. M. U.; CROWTHER, B. G. An airborne multispectral video/radiometer remote sensing system: Development and calibration. *Remote Sensing of Environment*, v. 49. issue 3, p. 187-194, 1994.
- NIXON, P. R. et al. Multiband video system for quick assessment of vegetal condition and discrimination of plant species. *Remote sensing of environment*, v.17, issue 2, p.203-208, 1985.
- NOVO, E. M. L. M. *Sensoriamento remoto: princípios e aplicações*. São Paulo: Edgard Blucher, p. 127, 1989. 2. ed.
- POMPERMAYER NETO, P.; COUTO, H. T. Z. do. Utilização de imagens de videografia aérea na detecção de deficiências nutricionais em plantios de eucalipto. *Scientia Forestalis*. n. 63, p. 23-31, 2003.
- SCHIMEL, D. S. Terrestrial ecosystems and the carbon cycle. *Global Change Biology*, v. 1, issue 1, p. 77-91, 1995.
- TERRA VERDE. Terrahawk™ - Aerial Imaging System. Disponível em <http://www.terraverdetch.com/Terrahawk/thdescription.php>. Acesso em: 26 mar., 2008.
- WIEGAND, C. L. et al. Photographic and videographic observations for determining and mapping the response of cotton to soil salinity. *Remote Sensing of Environment*, V. 49, issue 3, p. 212-223, 1994.