

## **Avaliação temporal do sequestro de carbono por meio de imagens orbitais na região de Botucatu-SP**

Vanessa Durante Polonio<sup>1</sup>  
Roberto Filgueiras<sup>1</sup>  
Tânia Maria de Carvalho<sup>1</sup>  
Donizeti Aparecido Pastori Nicolete<sup>1</sup>  
Anderson Antonio da Conceição Sartori<sup>1</sup>  
Célia Regina Lopes Zimback<sup>1</sup>

Universidade Estadual Paulista – UNESP/FCA  
Caixa Postal 237 – 38807100 – Botucatu – SP, Brasil  
van\_polonio@hotmail.com

{betofilgueiras, taniacarvalho2010, dnicolete, sartori80, czimback}@gmail.com

**Abstract.** High atmospheric concentrations of global warming gases produced by anthropogenic activities have generated great demand for research about stocks and fluxes of carbon. The study aimed to assess the relationship between the spectral indices (NDVI, PRI e CO<sub>2</sub>flux) in Botucatu - SP, to find relations of stock and carbon sequestration, in a time series of 30 years. For research, three scenes from different dates were selected; all of these images is of the Landsat-5 TM sensor from orbit / point 220/076. The scenes were chosen in three different years, at the same season. The first chosen scene was the image of the day 12/09/1991, the second chosen scene was of the day 25/10/2001, and the last image chosen was of the day 19/09/2011. The maps of NDVI, PRI and CO<sub>2</sub>flux showed us a huge variation, when compared temporally. The scene of 2001 possess better performance in carbon sequestration, since it possessed higher values of NDVI, which it is directly proportional to the carbon sequestration. The higher is the value of CO<sub>2</sub>flux greater amount of the carbon stored, allowing better development conditions for vegetation. A significant increase was observed in the values of CO<sub>2</sub> flux for Barra Bonita dam along the temporal analysis, in the same manner as was observed on the image of NDVI. The indices used allowed us to observe the progress of degradation in Barra Bonita dam, representing the behavior of the environment over the years.

Palavras-chave: remote sensing, carbon sequestration, vegetation index; sensoriamento remoto, sequestro de carbono, índice de vegetação.

### **1 Introdução**

As mudanças climáticas estão relacionadas ao aumento da poluição, desmatamento, queimadas, e a formação de ilhas de calor nas grandes cidades. Com o passar das décadas a produção industrial teve aumento significativo e continua crescendo, acarretando aumento de poluentes na atmosfera que intensificaram o efeito estufa. Com o aumento do efeito estufa há uma tendência de aumento da temperatura média da Terra, conhecido como “Aquecimento Global”, tendo como principal agente o gás carbônico - dióxido de carbono ou CO<sub>2</sub> (Rodrigues, 2010).

De acordo com muitas publicações sobre a elevação das concentrações atmosféricas dos principais gases de efeito estufa influenciadas por atividades antrópicas, houve grande demanda em trabalhos sobre estoque e fluxo de carbono (IPCC, 2007).

A demanda por métodos que quantificam o estoque de CO<sub>2</sub> em ambientes florestais vem crescendo nas empresas brasileiras. Diversos estudos vêm sendo orientados na mensuração do estoque tanto de florestas plantadas, quanto de florestas nativas tropicais (Gorgens et al., 2005).

Rahman et al. (2000) propuseram a integração do índice de reflectância fotoquímica, ou PRI - Photochemical Reflectance Index, que representa a eficiência do uso da luz na fotossíntese, com o índice de vegetação por diferença normalizada, ou

NDVI - Normalized Difference Vegetation Index (Rouse et al., 1973), que representa o vigor da vegetação fotossinteticamente ativa, o que tornaria possível, segundo o autor, integrar as feições de absorção decorrentes do sequestro florestal de carbono. A esse índice integrado, Baptista (2003) chamou de CO<sub>2</sub>flux.

O presente trabalho teve como objetivo avaliar as correlações entre índices espectrais (NDVI, PRI e CO<sub>2</sub>flux), visando encontrar relações de estoque e sequestro de carbono, bem como correlacionar NDVI e parâmetros obtidos do fluxo de CO<sub>2</sub> em uma série temporal de 30 anos.

## 2 Material e Métodos

### 2.1 Área de estudo

A área de trabalho se encontra na região de Botucatu, limitada pelas coordenadas planas - UTM: 739.755 m E e 799.725 m E; 7.493.845 m S e 7.448.875 m S, zona 22 S, DATUM WGS-84 (Figura 1).

O clima da região teve a mesma classificação climática pelo método de Köppen, do tipo Cfa, clima temperado quente (mesotérmico) úmido, e a temperatura média do mês mais quente é superior a 22°C (Cunha e Martins, 2009). A vegetação da região é classificada como Cerrado Tropical Subcaducifólio, entretanto, atualmente há alguns vestígios de vegetação na forma de pequenos maciços nas encostas íngremes de morros ou em galerias (Embrapa, 1988).

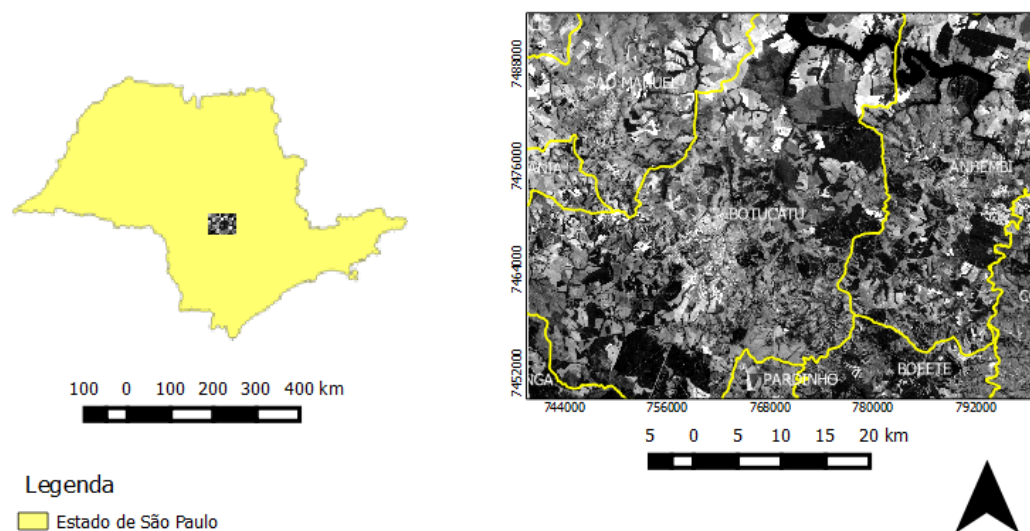


Figura 1. Localização da área de estudo

### 2.2 Seleção das cenas

O Landsat 5 tem em sua composição sensores: o sistema de escâner multiespectral (MSS) e o instrumento Thematic Mapper ( TM ), com sete bandas espectrais (USGS, 2013).

Para o trabalho, foram selecionadas três cenas de diferentes datas, todas do sensor TM do Landsat 5, órbita/ponto 220/076, presentes no catálogo de cenas do GLOVIS. A escolha das cenas teve como critério, o período com menor cobertura de nuvens nos três diferentes anos na mesma época aproximadamente. A primeira cena escolhida foi a imagem de 12/09/1991, a segunda 25/10/2001 e a última imagem de 19/09/2011.

### 2.3 Processamento das imagens

Após a escolha das cenas, faz-se necessário um pré-processamento como o georreferenciamento e a correção atmosférica. Para esse fim, foi utilizado o software QUANTUM GIS 2.2.0 e o SPRING 5.1.8.

Para correção atmosférica, foi utilizada a planilha desenvolvida por Gürtler, (2005), que se baseia na teoria da subtração do objeto escuro, desenvolvido por Chaves (1988).

O início do procedimento começa com a transformação dos níveis de cinza das imagens, em valores de radiância espectral, passo este denominado de calibração radiométrica (Equação 1).

$$L\lambda_i = a_i + \frac{b_i + a_i}{255} X ND \quad (1)$$

As radiâncias espectrais máxima e mínima de cada banda são representadas pelas letras  $a_i$  e  $b_i$ , respectivamente (Tabela 1), e  $ND$  a intensidade do pixel (número inteiro de 0 a 255).

Tabela 1 - Coeficientes de calibração e irradiâncias espectrais no topo da atmosfera.

Bandas	Comprimento de onda ( $\mu\text{m}$ )	Coeficientes de calibração ( $\text{wm}^{-2} \text{sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$ )		Irradiância espectral no topo da atmosfera ( $\text{wm}^{-2}$ $\mu\text{m}^{-1}$ )
		<b>a</b>	<b>B</b>	
1 (azul)	0,45-0,52	-1,5	152,1	1957
2 (verde)	0,52-0,60	-2,8	296,8	1829
3 (vermelho)	0,63-0,69	-1,2	204,3	1557
4 (IV próximo)	0,76-0,79	-1,5	206,2	1047
5 (IV médio)	1,55-1,75	-0,37	27,19	219,3
6 (IV termal)	10,4-12,5	1,238	15,303	-
7 (IV médio)	2,08-2,35	-0,15	14,38	74,52

Fonte: Adaptada de Chandlers e Markham (2003).

Tendo os dados de radiância espectral é possível calcular a refletância monocromática (Equação 2), a qual representa a quantidade de energia incidente no pixel que é refletida pelo mesmo. Esta pode ser calculada seguindo equação proposta por Bastiassen (1995).

$$\rho\lambda_i = \frac{\pi \cdot L\lambda_i}{K\lambda_i \cdot \cos Z \cdot dr} \quad (2)$$

### 2.4 Índices de Vegetação (IVs)

NDVI (Equação 3) tem sido um dos mais utilizados índices de vegetação. Ele se baseia na alta absorção da clorofila que é constatada na região espectral do vermelho e na alta refletância esclarecida pela estrutura interna das folhas na região do infravermelho próximo. O valor de NDVI varia entre -1 e 1. Geralmente em vegetações saudáveis, o índice apresenta valores em torno de 0,2 e 0,8 (Rouse et al., 1973).

$$NDVI = \frac{(R_4 - R_3)}{(R_4 + R_3)} \quad (3)$$

Onde:  $R_3$ = Refletância relativa à banda 3 do Landsat TM 5;  $R_4$ = Refletância relativa à banda 4 do Landsat TM 5

O NDVI nos permite o mapeamento da vegetação fotossinteticamente ativa em uma determinada área. É considerado por muitos autores como um bom estimador de

biomassa, conseqüentemente pode ser relacionado com o estoque de carbono na planta (Coltri et al., 2009).

PRI (Equação 4) é sensível às alterações nos pigmentos de carotenoides (principalmente a xantofila) na folhagem. Tais pigmentos são indicativos da eficiência do uso da luz fotossintética ou da taxa de dióxido de carbono armazenada pela folhagem por unidade de energia absorvida. Esse índice é usado em estudos de estresse e de produtividade da vegetação. Os valores variam entre -1 e 1, e valores comuns para vegetação sadia ficam entre -0,2 e 0,2 (Gamon et al., 1992).

$$PRI = \frac{(R_1 - R_2)}{(R_1 + R_2)} \quad (4)$$

Onde:  $R_1$  = Reflectância relativa à banda 1 do Landsat TM 5;  $R_2$  = Reflectância relativa à banda 2 do Landsat TM 5

O PRI expressa a relação entre as bandas do verde e azul e, segundo Rahman et al. (2000), pode ser relacionado com a eficiência do uso da luz no processo fotossintético.

Salienta-se, porém, que os dados de PRI devem ser reescalados para valores positivos, gerando um novo índice, o sPRI (Equação 5). Assim, o sequestro florestal de carbono depende da integração desses dois índices (NDVI e sPRI), que geram um novo índice: o  $CO_2$ flux (Baptista, 2003; Baptista, 2004).

$$sPRI = \frac{(PRI + 1)}{2} \quad (5)$$

Após realizado o cálculo do índice PRI, foi calculado o índice sPRI, seguindo a metodologia proposta por Rahman et al. (2000). O índice sPRI possui o mesmo significado do PRI, mas passa a ser representado em uma escala que varia entre 0 e 1 para, assim, ficar com a mesma escala do NDVI. Os índices NDVI e PRI foram combinados, segundo a metodologia de Rahman et al. (2000), para gerar o índice  $CO_2$ flux.

### 3 Resultados e Discussão

Os mapas de NDVI (Figura 2) nos mostrou grande variação quando comparado temporalmente. No ano de 2001 os valores encontrados são relativamente maiores quando comparados aos anos de 1991 e 2011. Os valores mais elevados encontrados na área de estudo para o ano de 2001 deve-se principalmente, à data de aquisição desta, visto que se iniciava o período chuvoso na região (final de outubro), diferentemente dos outros anos que tiveram imagens captadas no final do período seco (início de setembro).

Nota-se que nos anos de 1991 e 2001 os valores do NDVI na represa são inferiores aos estimados para 2011, uma explicação provável a este acontecimento é devido à eutrofização causada por atividades antrópicas no entorno da área, pois quanto maior o teor de poluição, o ambiente torna-se favorável ao crescimento e desenvolvimento de macrófitas. A presença dessas faz com que o NDVI seja mais elevado na represa, devido ao comportamento espectral característico da vegetação.

Nos mapas do PRI (Figura 3) podemos observar três comportamentos distintos onde no ano de 1991 os valores variaram entre -0,06 e 0,12; no ano de 2001, grande parte dos valores se encontram inseridos no intervalo de -0,14 e 0,00 tendo regiões esparsas com valores próximos a 0,12; diferente do observado no ano de 2011 em que os valores tiveram intervalo entre -0,22 e -0,06 na maior parte da área de estudo.

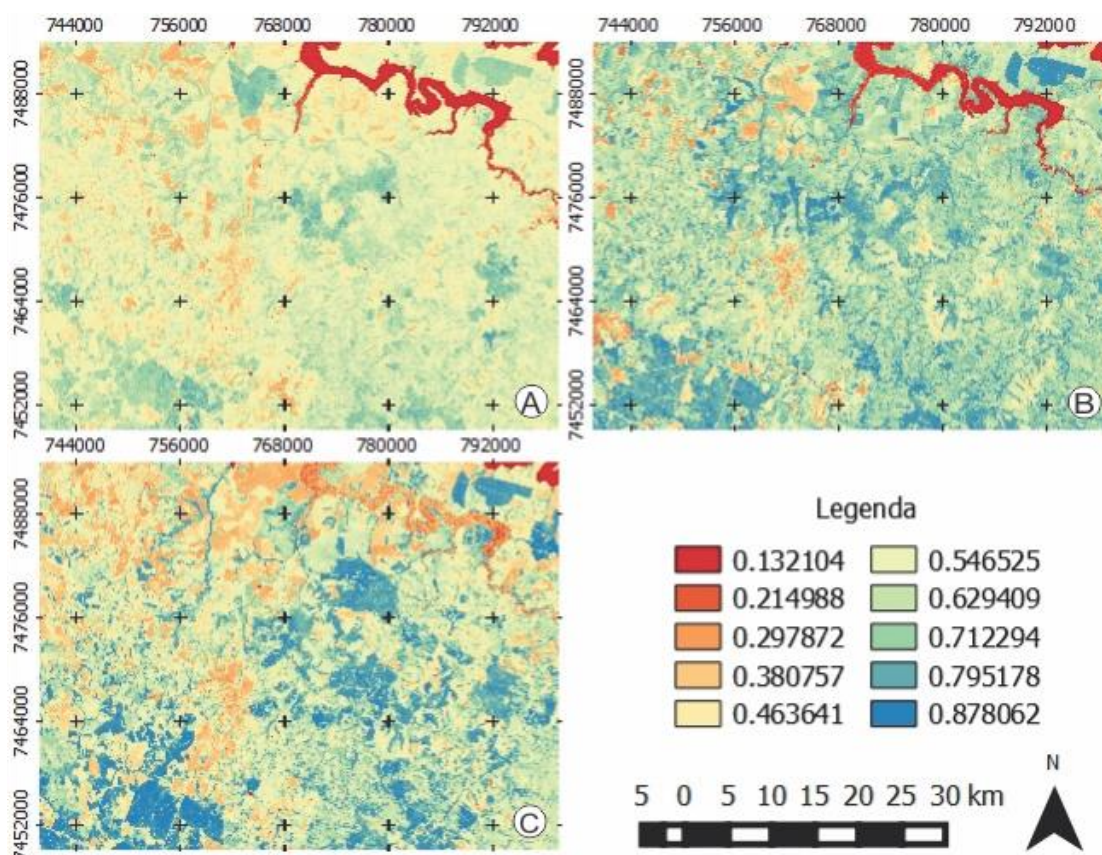


Figura 2. Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (NDVI) cenas de 1991 (A), 2001 (B) e 2011 (C).

Nesse sentido, segundo Gamon et al. (1997), quanto mais próximo de zero for o PRI, maior a capacidade de utilização da luz pela fotossíntese, e, portanto, maior deve ser a eficiência da planta em realizá-la. Então, o ano em que os valores em sua maioria se encontraram próximo ao valor zero, foi o de 2001. Sendo o mesmo ano em que se obteve o os maiores valores de NDVI. Trazendo essa informação para o contexto do carbono atmosférico, quanto melhor o uso da radiação e quanto maior for a fotossíntese, maior a possibilidade da planta absorver o carbono atmosférico para os processos fotossintéticos e, conseqüentemente, maior a quantidade de carbono estocado (Coltri et al., 2009).

A Figura 4 apresenta as cartas de CO<sub>2</sub>flux para os anos de 1991, 2001 e 2011. Os valores do índice CO<sub>2</sub>flux representam valores de carbono absorvido pela vegetação e nos mapas gerados os valores foram de 0,06 a 0,44. Silva e Baptista (2013) encontraram intervalo de valores de CO<sub>2</sub>flux semelhantes para a região oeste do Pará em 2008. Teobaldo (2013) também adquiriram valores no mesmo intervalo do índice CO<sub>2</sub>flux para o Parque Nacional de Brasília em 2010 em um estudo com queimadas.

Quanto maior o valor de CO<sub>2</sub>flux, maior quantidade de carbono estocado, o que permite melhor condições de desenvolvimento para a vegetação. Foi observado um aumento expressivo dos valores de CO<sub>2</sub>flux para a represa de Barra Bonita ao longo da análise temporal da mesma maneira que foi observado no NDVI.

Analisando o comportamento das demais áreas, o ano de 2001 apresentou os maiores valores de CO<sub>2</sub> estocado devido ao fato de maior vigor vegetativo presente.



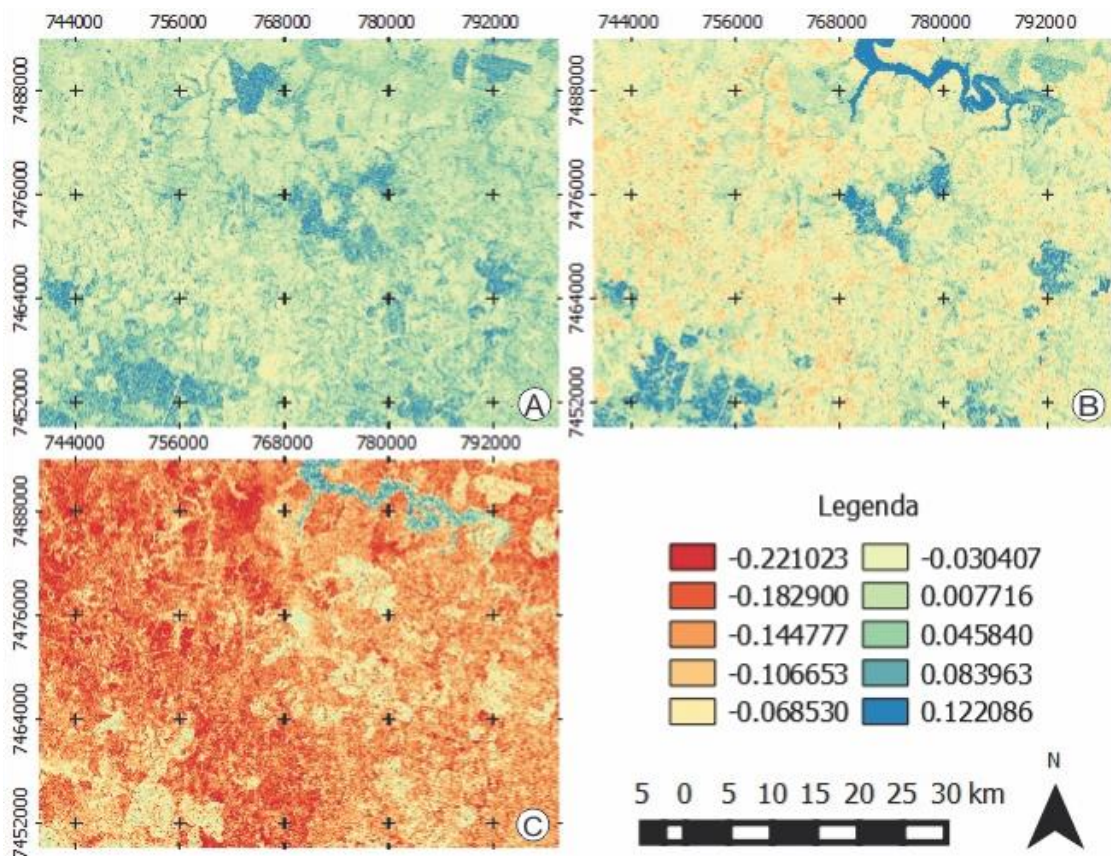


Figura 3. Índice de Reflectância Fotoquímica (PRI) nas cenas de 1991 (A), 2001 (B) e 2011 (C).

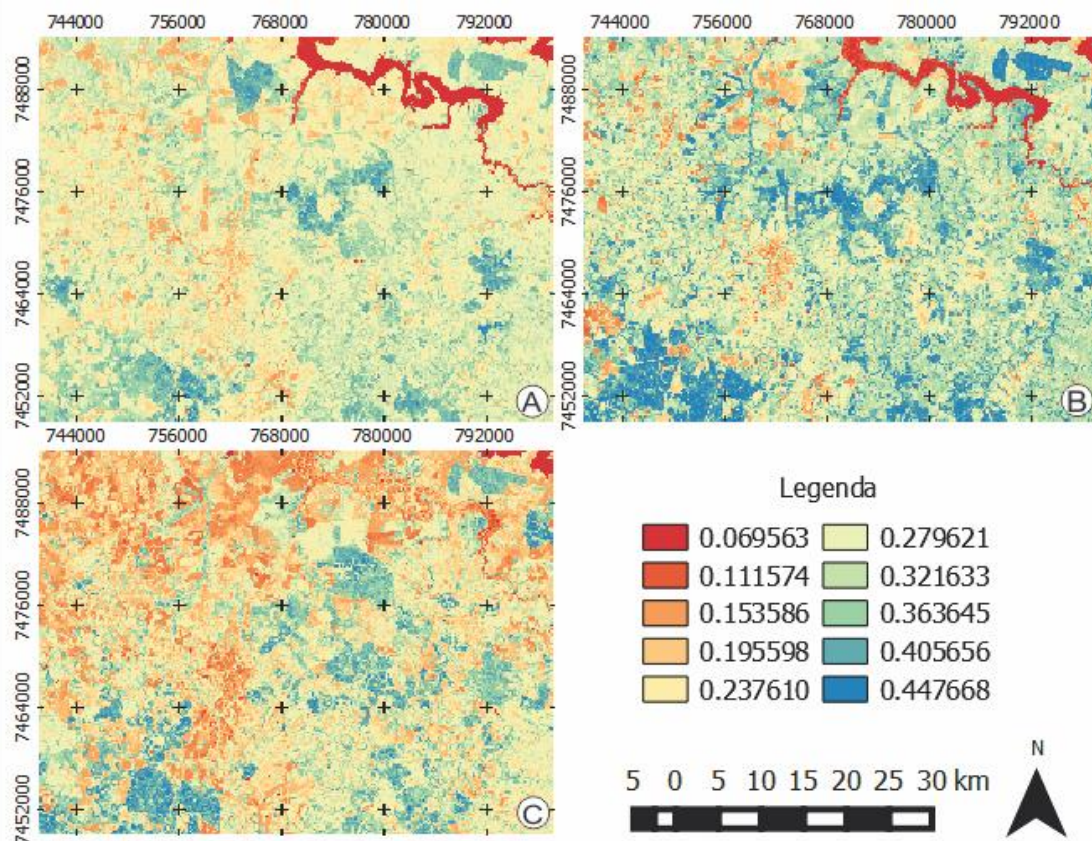


Figura 4. Índice CO<sub>2</sub>flux cenas de 1991 (A), 2001 (B) e 2011 (C).

#### 4 Conclusão

Pôde-se concluir que o CO<sub>2</sub>flux obteve valores significativos em relação aos outros índices e por possuir mesma variação de intervalo de valores semelhantes em outros trabalhos.

A cena de 2001 possuiu melhor rendimento no sequestro de carbono visto que possuiu maiores índices de NDVI pela vegetação respondendo espectralmente pelo seu vigor, conseqüentemente o sequestro de carbono aumenta.

Os índices utilizados nos permitiu observar o avanço da degradação na represa de Barra Bonita, representando fielmente o comportamento do ambiente com o passar dos anos.

Para uma aproximação melhor de resultados na utilização do CO<sub>2</sub>Flux e do PRI, há necessidade de considerar uma combinação de modelos e de outros métodos de classificação das imagens. Além disso, experimentos de campo combinando torres com medições de CO<sub>2</sub>flux são importantes.

#### Referências Bibliográficas

- Baptista, G. M. M. Validação da Modelagem de sequestro de carbono para ambientes tropicais de cerrado, por meio de dados Aviris e Hyperion. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (SBSR), 11., 2003, Belo Horizonte. **Anais...**São José dos Campos: INPE, 2003. Artigos, p. 1037-1044. Disponível em: [http://marte.dpi.inpe.br/col/ltd.inpe.br/sbsr/2002/09.07.21.45/doc/10\\_002.pdf](http://marte.dpi.inpe.br/col/ltd.inpe.br/sbsr/2002/09.07.21.45/doc/10_002.pdf). Acesso em: 25 out. 2014.
- Baptista, G.M.M. Mapeamento do Sequestro de Carbono e de Domos Urbanos de CO<sub>2</sub> em Ambientes Tropicais, por meio de Sensoriamento Remoto Hiperespectral. **Geografia** (Rio Claro), v. 29, p. 189-202, 2004.
- Bastiaanssen, W.G.M. Regionalization of Surface Flux Densities and Moisture Indicators in Composite Terrain – **A Remote Sensing Approach under Clear Skies in Mediterranean Climates**. Thesis, Land bouw universite it Wageningen, Netherlands, 273, 1995.
- Chander, G., & Markham, B. L. (2003). Revised Landsat-5 TM radiometric calibration procedures, and post-calibration dynamic ranges. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 41, 2674 – 2677.
- Coltri, P.P.; Ramirez, G.M.; Walter, M.K.C.; Junior, J.Z.; Pinto, H.S.; Nascimento, C.R.; Gonçalves, R.R.V. Utilização de índices de Vegetação para Estimativas não Destrutivas da Biomassa, Estoque e Sequestro de Carbono no Cafeeiro Arábica. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (SBSR), 14., 2009, Natal. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2009. Artigos, p. 121-128. Disponível em: <http://marte.sid.inpe.br/col/dpi.inpe.br/sbsr@80/2008/11.17.15.21/doc/121-128.pdf>. Acesso em 25 out. 2014.
- Chavez, P.S. Na Improved dark-object subtraction technique for atmospheric scattering correction of multispectral data. **Remote Sensing of Environment**, v.24, p.459-479, 1988.
- Cunha, A. R.; Martins, D. Classificação Climática para os Municípios de Botucatu e São Manuel, SP. **Irriga**, v.14, n.1, p.1-11, 2009.
- Empresa Brasileira De Pesquisa Agropecuária. **Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos. Critérios para distinção de classes de solos e de fases de unidades de mapeamento - normas em uso pelo SNLCS**, Doc. n. 11, Rio de Janeiro, 1988. 65 p
- Intergovernmental Panel On Climate Change, IP IPCC. 2007. **Mudança do Clima 2007: a base das Ciências Físicas**. Contribuição do Grupo de Trabalho I para o Quarto Relatório de Avaliação do Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima. Website: <http://www.ipcc.ch>

Gamon, J.A.; Serrano, L.; Surfus, J.S. (1997). The photochemical reflectance index: an optical indicator of photosynthetic radiation use efficiency across species, functional types, and nutrient levels. **Oecologia**, vol. 112 (4): 492-501.

Gamon, J. A.; Penuelas, J.; Field, C. B. A narrow-waveband spectral index that tracks diurnal changes in photosynthetic efficiency. **Remote Sensing of Environment**, v.41, n.1, p.35-44, 1992.

Gorgens, E. B; Oliveira, M. L. R; Leite, H. G; Brum Neto, M. S. Metodologia para monitoramento do estoque de carbono: Revisão e estudo de caso. **Biomassa & Energia**, v. 2, n. 2, p. 169-175, 2005.

Gürtler, S. et al. Planilha Eletrônica para o cálculo da reflectância em imagens TM e ETM+ LANDSAT. **Revista Brasileira de Cartografia**, v.2, n.57, p.162-167, 2005.

Rahman, A.F.; Gamon, J.A.; Fuentes, D.A.; Roberts, D.; Prentiss, D.; Qiu, H. 2000. **Modeling CO2 flux of boreal forests using narrow-band indices from AVIRIS imagery**. AVIRIS Workshop, JPL/NASA, Pasadena, Califórnia.

Rouse, J.W.; Haas, R.H.; Schell, J.A.; Deering, D.W. **Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS**. In 3rd ERTS Symposium, NASA. 1973.

Rodrigues, C. P. **Estudo do fluxo de carbono utilizando geotecnologias**. 2010. 93 p. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Universidade Estadual do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2010.

Silva, S. C. P.; Baptista, G. M. M. Variações na modelagem do sequestro florestal de carbono por meio de dados hiperespectrais na Floresta Nacional do Tapajós, Pará. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (SBSR), 16., 2013, Foz do Iguçu. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2013. Artigos, p. 9020-9027. Disponível em: <http://www.dsr.inpe.br/sbsr2013/files/p0063.pdf>. Acesso em: 24 out. 2014.

Teobaldo, D. **Sequestro florestal de carbono e avaliação de resiliência: o caso do incêndio no Parque Nacional de Brasília em 2010**, 2013. 63 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Ciências Ambientais) – Instituto de Geociências, Universidade de Brasília – UnB, Brasília. 2013.

USGS. United States Geological Survey (USGS). Disponível em <<http://earthexplorer.usgs.gov/>> Acesso em 22 Out. 2014.