

Variações na Modelagem do Sequestro Florestal de Carbono por meio de Dados Hiperespectrais na Floresta Nacional do Tapajós, Pará.

Suzy Cristina Pedroza da Silva¹
Gustavo Macedo de Mello Baptista¹

¹ Universidade de Brasília – UnB/IG
Caixa Postal 4465 - 70910-90 - Campus Universitário Darcy Ribeiro, Asa Norte - Brasília - DF, Brasil
{suzyycris, gmbaptista}@unb.br

Abstract.

The aim of this study is analyze the influence of vegetation indices in spatial forest carbon sequestration, through CO₂flux proposed by Rahman et al. (2000) and by changes in its structure by adopting the other vegetation indices (EVI and EVI2) in the Tapajós National Forest, Para, by means of a Hyperion scene. Besides the changes, rates of carbon sequestration were correlated with ICO₂ spectral index. We observed more details of photosynthetic activity with these two indices, and the CO₂fluxEVI showed intermediate values in the A-B transect, compared to CO₂flux, which had the highest values and CO₂fluxEVI2 with minors. The highest determination coefficient between the carbon sink and the CO₂ content in the atmospheric column of air was obtained with CO₂flux ($R^2 = 0.84$), but the CO₂fluxEVI and CO₂fluxEVI2 presented higher R^2 (0.73 and 0.59) too. The Pearson correlation matrix could be concluded that the NDVI is the index that best correlates with CO₂flux and ICO₂. However, the other two indexes proposed also have high correlations with the advantage of minimizing saturation, soil background and atmospheric effects.

Palavras-chave: hyperspectral imaging, carbon sink, Amazon, imagem hiperespectral, sequestro de carbono, Amazônia.

1. Introdução

A forma natural de sequestrar o CO₂ pela vegetação é por meio da fotossíntese, cujo processo permite fixar o carbono em forma de matéria lenhosa nas plantas. As áreas florestadas são consideradas como poços de carbono (*carbon sinks*) sendo responsáveis por um estoque de 500 GtC (YU, 2004).

O processo de modelagem por sensoriamento remoto oferece um desafio na compreensão dessas questões, entretanto é necessário compreender todo aspecto ambiental, bem como o conteúdo das medições remotas.

Os índices de vegetação possuem um papel fundamental e se baseiam na energia refletida na faixa do vermelho e infravermelho próximo e é diretamente relacionada à atividade fotossintética da vegetação, bem como na suposição de que a utilização de duas ou mais bandas espectrais pode, substancialmente, minimizar as principais fontes de ruídos que afetam a resposta da vegetação em relação às variações na irradiância solar; efeitos atmosféricos; contribuições da vegetação não fotossinteticamente ativa; contribuições do substrato; e efeitos da composição e estrutura do dossel (FERREIRA et al., 2008).

O CO₂flux (RAHMAN et al., 2000) é um índice que mede a eficiência do processo de sequestro de carbono pela vegetação e pode ser obtida por meio da integração dos índices de vegetação NDVI - *Normalized Difference Vegetation Index* (ROUSE et al., 1973) e do PRI - *Photochemical Reflectance Index* (GAMON et al., 1997). Baptista (2004), por meio do desenvolvimento do índice espectral ICO₂, mostrou ser possível avaliar a concentração de dióxido de carbono na coluna de ar adjacente aos alvos utilizando-se dados de radiância de sensores hiperespectrais e que essa é inversamente proporcional ao CO₂flux.

O NDVI, apesar de continuar sendo um dos índices mais utilizados em pesquisas na área de vegetação em sensoriamento remoto, por sua facilidade e simplicidade de aplicação, tem sua eficiência diminuída quando o alvo possui elevada biomassa devido ao fenômeno de saturação, como ocorre na Floresta Amazônica. O NDVI é não linear e satura em áreas com alta biomassa de vegetação (HUETE, 1988; HUETE et al., 2002).

De acordo com Huete et al., (1997), o índice de vegetação melhorado ou realçada (EVI), emprega as bandas espectrais do infravermelho próximo, região do vermelho e a reflectância na faixa do azul é utilizada para indicar o vigor vegetativo.

Entretanto, a banda do azul, utilizada no EVI, além de não fornecer informações adicionais sobre as propriedades biofísicas da vegetação e, por apresentar relação sinal/ruído muito baixa, não se encontra em muitos sistemas sensores. Para esses casos, Jiang et al., (2008), desenvolveram um novo índice de vegetação, baseado no EVI, mas sem a banda do azul, denominado de EVI2.

Assim, o presente estudo visa analisar a influência dos índices de vegetação na espacialização do sequestro florestal de carbono, por meio do CO₂flux proposto por Rahman et al. (2000) e por modificações em sua estrutura adotando-se os demais índices de vegetação (EVI e EVI2), na Floresta Nacional do Tapajós, no Pará, por meio de uma cena do sensor Hyperion. Além das alterações, os índices de sequestro de carbono foram correlacionados com o ICO₂.

2. Material e Métodos

2.1 Caracterização da área de estudo

A imagem Hyperion analisada nesse estudo corresponde à localização da torre de fluxo de CO₂ (LBA/INPA), denominada de k83, no oeste do Pará que está situada em floresta de exploração seletiva de madeira, localizada na Flona Tapajós, próximo ao km 83 da BR 163 (Figura 1).

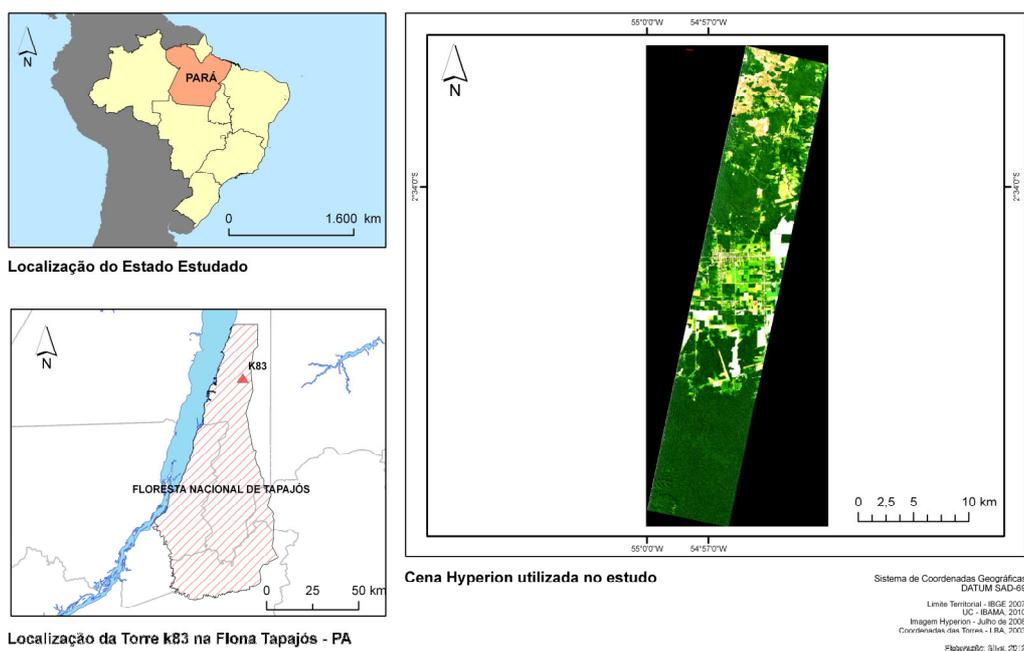


Figura 1. Localização da Área de Estudo.

A Floresta Nacional do Tapajós possui cerca de 560.000 ha, está localizado próximo à foz do rio Tapajós, abrangendo áreas dos municípios de Belterra, Aveiro, Rurópolis e Placas, Estado do Pará. É limitado geograficamente a oeste pelo rio Tapajós, a leste pela Rodovia Santarém-Cuiabá - BR-163.

A FLONA Tapajós é uma unidade do sistema de florestas nacionais administrado pelo Instituto Brasileiro de Meio Ambiente e Recursos Naturais Renováveis (IBAMA), criada pelo Decreto no. 73.684, de fevereiro de 1974 (HENRIQUES et al., 2008).

O clima da região é do tipo Am (classificação de Köppen), com temperatura média anual de 25,5 °C. A precipitação média anual está em torno de 1.800 mm e umidade relativa de 86%. Ao contrário da temperatura, o regime de chuvas apresenta grande variação durante o

ano, com as maiores precipitações ocorrendo nos meses de janeiro a maio. Segundo classificação do Radambrasil, a altitude média é de 175 m, o relevo é plano ou dissecado, as superfícies de aplainamento são inundadas periodicamente por ocasião das chuvas. Possui área com solo predominante do tipo Latossolo Amarelo Distrófico (IBAMA, 2004).

De acordo com Veloso (1991), a vegetação é classificada como Floresta Ombrófila Densa, caracterizando-se pela dominância de indivíduos arbóreos de grande porte e pela abundância de lianas lenhosas, palmeiras e epífitas.

2.2. Pré-processamento das Imagens Hyperion

Neste estudo foi utilizada uma imagem hiperespectral, obtida pelo sensor Hyperion, instalado no satélite EO-1 (*Earth Observing-1*) da NASA, com porcentagem de cobertura de nuvens entre 0-9%, com nível de correção 1R, com as seguintes características (quadro 1).

Quadro 1 – Características da cena Hyperion.

Imagem Hyperion	EO1H2270622008184110P1_R
Data	02 / 07 / 2008
Cobertura de Nuvens	0% a 9%
Órbita / Ponto	227/62
Início de imageamento	13:36:00
Fim de imageamento	13:36:18
Inclinação do satélite	98.10
Altitude do sensor	705 km
Tamanho do Pixel	30 m

O pré-processamento foi dividido em duas etapas, sendo a primeira abrangendo os dados do VNIR para a determinação dos índices de vegetação, e a segunda, voltada aos dados do SWIR para a determinação do índice espectral ICO_2 .

Para os dados VNIR, foi realizada a correção atmosférica e conversão dos dados de radiância para reflectância de superfície utilizando-se o módulo FLAASH, que se baseia no modelo de transferência radiativa MODTRAN 4. Foi utilizada como altitude média de 0,150 km, com o modelo de aerossol Rural, visibilidade de 40 km e modelo atmosférico Tropical.

Geralmente, a absorção de aerossóis é pequena e os canais dos sensores multiespectrais evitam as faixas de absorção molecular, entretanto isso não ocorre nos sensores hiperespectrais, que possuem canais contíguos recobrendo toda uma faixa do espectro (BAPTISTA, 2006).

Embora as imagens hiperespectrais forneçam um espectro contínuo variando de 0,4 a 2,5 μm para um dado pixel, geram uma grande quantidade de dados necessários para o processamento, influenciando na demanda computacional para a realização dos processamentos, e por possuir bandas estreitas contíguas, grande parte dos dados do espectro é redundante, além da suscetibilidade às interferências de ruídos, o que dificulta a identificação e na análise de materiais (GREEN et al, 1988).

A fim de eliminar a redundância dos dados e consequentemente os ruídos gerados, a imagem foi pré-processada utilizando as transformações de *Minimum Noise Fraction* – MNF.

Para o processamento e análise de MNF utilizaram-se somente as bandas radiometricamente calibradas. Assim para o cálculo de CO_2 flux, aplicou-se a técnica de MNF nas bandas de 8 a 55 e para o cálculo de ICO_2 , nas bandas de 79 a 224.

2.3 Determinação do CO_2 flux a partir dos Índices NDVI, EVI e EVI2

O CO_2 flux mede a eficiência do processo de sequestro de carbono pela vegetação e pode ser obtida por meio da integração dos índices de vegetação NDVI - *Normalized Difference Vegetation Index* (ROUSE et al., 1973) e do PRI - *Photochemical Reflectance Index* (GAMON et al. 1997).

De acordo com Rouse et al. (1973), o índice NDVI consiste na diferença normalizada de reflectância entre a feição de absorção do vermelho (660.85 nm) e o aumento de albedo que ocorre nos espectros de vegetação após o início do infravermelho próximo – 803.30 nm, adaptado às bandas do Hyperion.

O PRI mede a diferença existente entre a feição de absorção no azul (528.57 nm) e o pico de reflectância do verde (569.27 nm) e pode ser correlacionado com a eficiência da luz na fotossíntese (GAMON, et al. 1997).

Entretanto, para a determinação do CO₂flux, Rahman et al., (2000) salientam que o PRI necessita de um reescalonamento de seus valores para positivos, denominado de sPRI – *Scaled Photochemical Reflectance Index*.

A determinação do índice CO₂flux é realizada pela multiplicação dos planos de informação NDVI e sPRI.

Outra questão é verificar a influência na análise do sequestro florestal de carbono por meio CO₂flux, adotando-se outros índices de vegetação (EVI e EVI2) proposto por Huete et al., (1997) e Jiang et al., (2008), respectivamente. Para tal, manteve-se o sPRI e o multiplicou pelo EVI e pelo EVI2 e essas modificações foram chamadas de CO₂fluxEVI e CO₂fluxEVI2, respectivamente.

O EVI - *Enhanced Vegetation Index* (HUETE et al., 2002) proporciona uma sensibilidade melhorada em regiões de alta biomassa, minimizando as influências do solo e da atmosfera. Entretanto é limitado pelos sistemas sensores que não operam na região espectral concebida com a banda azul, o que torna difícil gerar em longo prazo, séries temporais de EVI como são obtidas pelo NDVI.

Neste estudo utilizou-se também o índice de determinação do conteúdo de CO₂ na coluna de ar atmosférico adjacente aos alvos, o ICO₂ desenvolvido por Baptista (2004). O ICO₂ é determinado pela intensidade da feição de absorção do gás centrada em 2000 nm, por meio da subtração do ponto máxima radiância de 2032.35 nm e do ponto de mínima de radiância de 2002.06 nm.

A cena processada do sensor Hyperion foi analisada por regressão linear e pelo teste *U* para verificação da correlação e similaridade estatística entre os dados, respectivamente.

3. Resultados e Discussão

O NDVI tem sua eficiência diminuída quando o alvo possui elevada biomassa, devido ao fenômeno de saturação. O índice de vegetação melhorado (EVI) é utilizado para indicar o vigor vegetativo. O EVI proporciona uma sensibilidade melhorada em regiões de alta biomassa, minimizando as influências do solo e da atmosfera. O EVI2, não usa a banda do azul, mas baseia-se nos mesmos princípios de atenuação da interferência de background, bem como a dos efeitos atmosféricos que motivaram a construção do EVI. Para entender como esses três índices se relacionam adotou-se primeiro a regressão linear entre EVI como variável independente e EVI2 como dependente. Como os dois índices partem das mesmas premissas e um é uma alteração do outro, a regressão linear apresentou um coeficiente de determinação altíssimo, $R^2 = 0,97$. Porém, ao se adotar NDVI como variável independente e os demais como dependentes, notou-se que a relação entre eles é não linear, sendo que o coeficiente de determinação com EVI foi de 0,53 e com o EVI2, 0,37 (Figura 2).

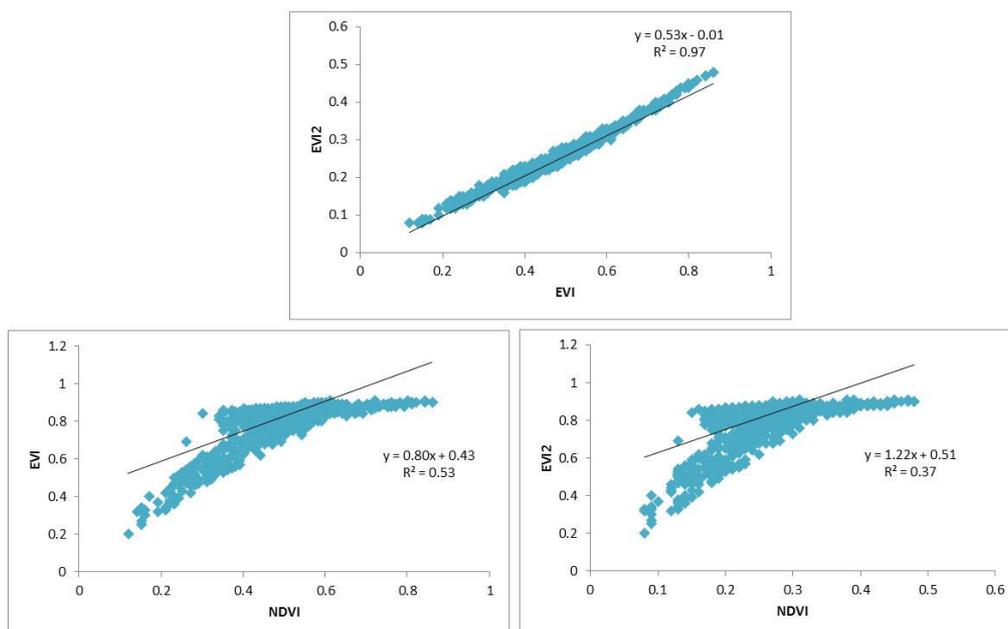


Figura 2 - Relações entre os índices de vegetação NDVI, EVI e EVI2.

Para evidenciar o comportamento espacial dos índices, adotou-se um transecto A-B em cada cena e os plotaram no gráfico apresentado na figura 3. A figura 3 apresenta também os transectos plotados sob as cenas referentes aos índices de vegetação. O transecto de NDVI apresenta os maiores valores e apresentou valores médios em torno de 0,80 (com desvio padrão de 0,11), numa escala de -1 a 1. Apesar de apresentar alguns valores mais baixos referentes às áreas de baixa cobertura vegetal, não houve valores negativos em nenhum dos índices.

Tanto EVI como EVI2 apresentaram mesmas tendências espaciais, porém, os valores de EVI apresentam média de 0,47 (com desvio padrão de 0,10), enquanto EVI2 apresentou média de 0,24 (com desvio padrão de 0,05), sendo esses os menores valores ao longo de todo o transecto. O coeficiente de variação de NDVI foi o mais baixo, 13,76%, enquanto que o EVI apresentou 21,35% e o EVI2, 22,48%. Isso era de se esperar, pois a saturação do NDVI, evidente por ser a imagem mais clara das três apresentadas, acaba reduzindo as nuances que aparecem na paisagem. Um exemplo disso pode ser verificado na porção central dos transectos de EVI e EVI2 que apresenta um pico, não tão percebido no transecto de NDVI e que corresponde a uma área antropizada, provavelmente de cultura, que apresenta maiores valores de atividade fotossintética (Figura 3).

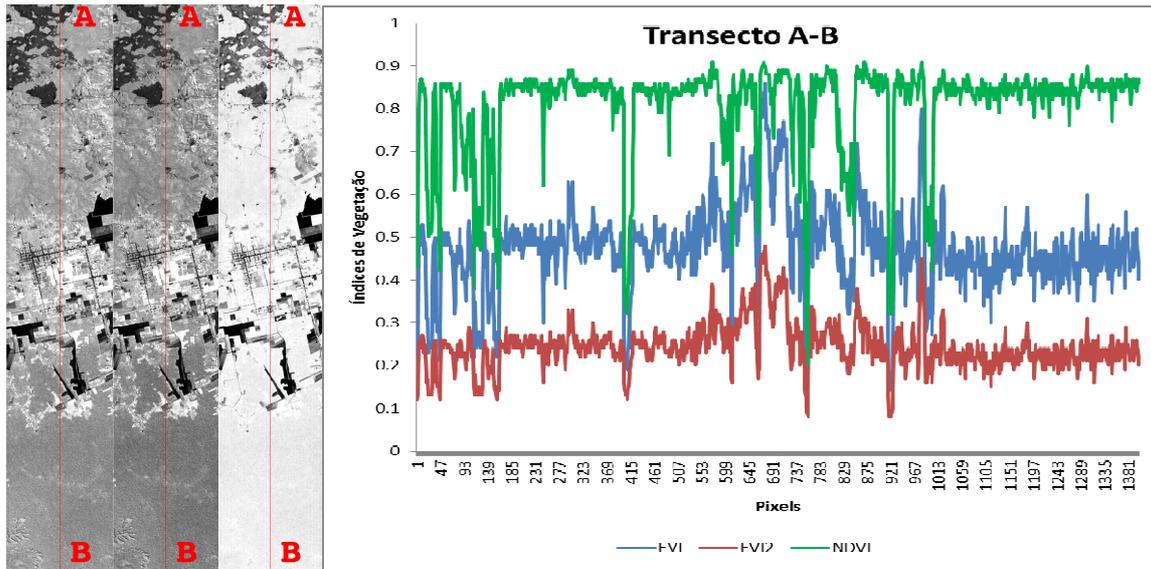


Figura 3. Transectos A-B dos índices de vegetação EVI, EVI₂ e NDVI da Imagem Hyperion.

Visando analisar como esses índices influenciam na determinação especializada do sequestro florestal de carbono, é necessário ter parâmetros de comparação. Para tal, adotou-se o ICO₂ que, obtido em outra região do espectro - SWIR, tende a se comportar de forma inversa ao do CO₂flux, que é obtida no VNIR, pois quanto mais a vegetação sequestra carbono na fase clara da fotossíntese, menor deve ser a concentração de CO₂ atmosférico na coluna de ar. A figura 4 apresenta o CO₂flux e ICO₂, bem como seus transectos A-B plotado em conjunto com o CO₂flux (Figura 4).

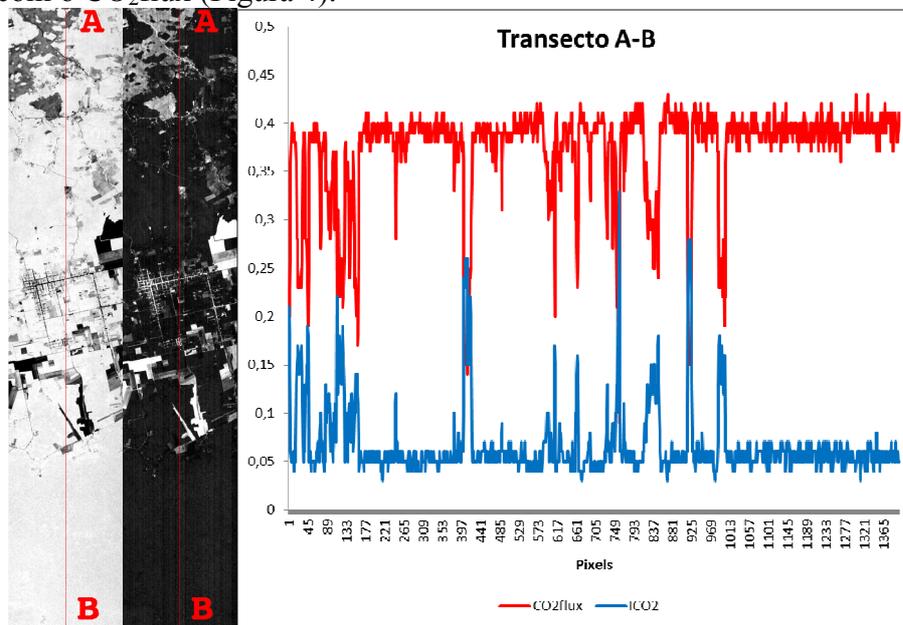


Figura 4. Índices de vegetação CO₂flux e ICO₂ obtidos e seus respectivos transectos A-B.

As áreas mais claras na imagem de ICO₂ correspondem às áreas que apresentam menores atividades fotossintéticas e que, portanto, representa os maiores conteúdos de CO₂ atmosféricos. A regressão linear entre os resultados descreve uma função negativa e um alto coeficiente de determinação ($R^2 = 0,84$) entre os dados de CO₂flux e ICO₂, podendo-se afirmar que 86% das variações de CO₂flux são explicadas pelo ICO₂. Entretanto, para os índices CO₂fluxEVI e CO₂fluxEVI₂, que utilizaram na sua estrutura o EVI₂ e EVI,

respectivamente, os resultados da regressão não linear polinomial de segunda ordem apresentaram valores mais baixos de coeficiente de determinação de 0,73 e 0,59 respectivamente (Figura 5).

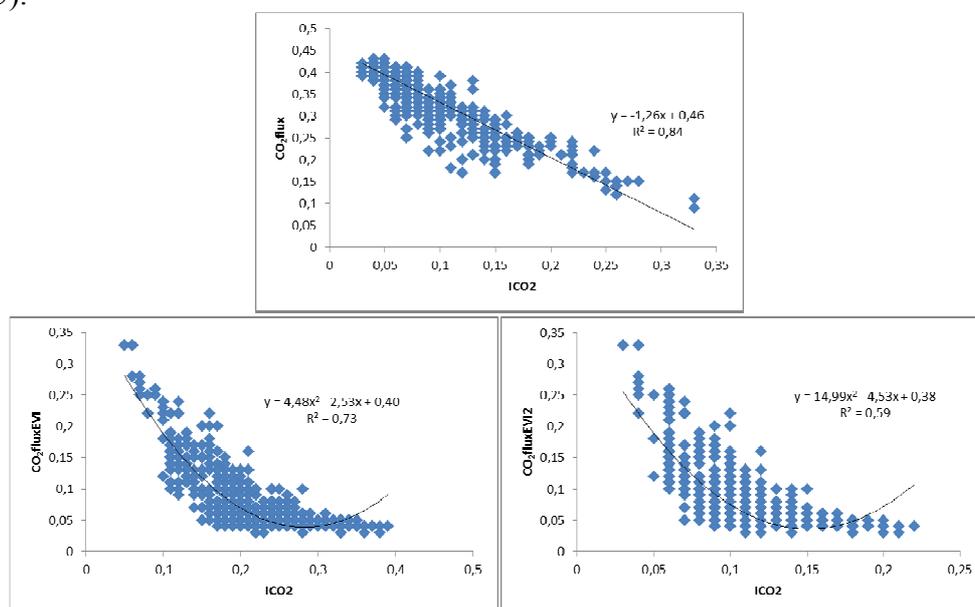


Figura 5 - Ajuste linear entre ICO_2 e CO_2flux e não lineares entre ICO_2 e $CO_2fluxEVI$ e $CO_2fluxEVI2$.

Visando testar a similaridade estatística entre os diversos índices testados, aplicou-se o teste não paramétrico de Mann-Whitney, conhecido como Teste U . Em todos os casos rejeitou-se a hipótese nula, ou seja, não existe similaridade entre os índices de vegetação entre NDVI, EVI, EVI2, CO_2flux , $CO_2fluxEVI$, $CO_2fluxEVI2$ e ICO_2 .

A matriz de correlação de Pearson foi calculada para todos esses índices e é apresentada na tabela 1. Pela matriz pode-se inferir que o NDVI é o índice que mais se correlaciona tanto com o CO_2flux como com o ICO_2 , ou seja, mesmo apresentando o problema de saturação, ele acaba se correlacionando melhor tanto com o sequestro florestal de carbono, como com o conteúdo de CO_2 na coluna de ar atmosférico. O índice proposto $CO_2fluxEVI$, porém, também apresentou uma boa correlação com o ICO_2 , com $r=-0,76$, bem como o $CO_2fluxEVI2$, com $r=-0,67$ e detectou nuances em termos de atividade fotossintética mascaradas pela saturação imposta pelo NDVI (Tabela 1).

Tabela 1 - matriz de correlação de Pearson.

	CO_2flux	$CO_2fluxEVI$	$CO_2fluxEVI2$	EVI	EVI2	NDVI	ICO_2
CO_2flux	1						
$CO_2fluxEVI$	0,79	1,00					
$CO_2fluxEVI2$	0,69	0,98	1,00				
EVI	0,77	1,00	0,98	1,00			
EVI2	0,66	0,98	0,99	0,99	1,00		
NDVI	0,99	0,82	0,72	0,80	0,70	1,00	
ICO_2	-0,92	-0,76	-0,67	-0,74	-0,65	-0,93	1,00

4. Conclusões

O presente estudo propôs minimizar os efeitos de saturação gerados pela presença do NDVI no índice espectral CO_2flux que representa o sequestro florestal de carbono. Essa minimização consistiu na utilização do EVI e do EVI2 na integração com o sPRI, gerando os índices $CO_2fluxEVI$ e $CO_2fluxEVI2$, respectivamente.

Nuances de atividade fotossintética puderam ser observadas nesses dois índices, sendo que o CO₂fluxEVI apresentou valores intermediários no transecto A-B adotado, se comparado ao CO₂flux obtido com o NDVI, que apresentou os maiores valores e o CO₂fluxEVI2 com os menores.

Correlacionando-se os índices de sequestro de carbono com o conteúdo de CO₂ na coluna de ar atmosférico adjacente aos alvos da cena, representado pelo ICO₂, o CO₂flux apresentou uma relação linear com coeficiente de determinação de 0,84, enquanto que o CO₂fluxEVI apresentou R² = 0,73 e o CO₂fluxEVI2, de 0,59.

Por meio da matriz de correlação de Pearson pôde-se inferir que o NDVI é o índice que mais se correlaciona tanto com o CO₂flux como com o ICO₂. Porém, os outros dois índices aqui propostos também apresentam elevados coeficientes de correlação, com a vantagem de incorporarem a minimização de efeitos de saturação, de *background* e atmosféricos.

O próximo passo é buscar as relações entre os índices de sequestro florestal de carbono, bem como de conteúdo de dióxido de carbono atmosférico com os dados coletados em campo pelas torres do projeto LBA.

Agradecimentos

À FAPEAM pela bolsa de doutorado da primeira autora. Aos professores do Laboratório de Sensoriamento Remoto e Análise Espacial do Instituto de Geociências – UnB, pela utilização para processamento e análises espectrais das imagens de satélite e ao INPA pela parceria com os Dados de Campo, pelo Projeto LBA – Torres de Medição do Fluxo de CO₂.

Referências Bibliográficas

- BAPTISTA, G. M. M. Mapeamento do sequestro de carbono e de domos urbanos de CO₂ em ambientes tropicais, por meio de sensoriamento remoto hiperespectral. **Geografia, Rio Claro**, v. 29, n. 2, p. 189-202, 2004.
- BAPTISTA, G. M. M. **Sensoriamento Remoto Hiperespectral: o novo paradigma nos estudos de solos tropicais**. Brasília: Universa, 2006.
- BAPTISTA, G. M. M. Validação da modelagem de seqüestro de carbono para Ambientes tropicais de cerrado, por meio de dados AVIRIS e HYPERION. In: XI SBSR, Belo Horizonte, Brasil, 05- 10 abril 2003. **Anais...** São José dos Campos: INPE, p. 1037-1044, 2003.
- FERREIRA, L. G.; FERREIRA, N. C.; FERREIRA, M. E. Sensoriamento remoto da vegetação: evolução e estado-da-arte. **Acta Sci. Biol. Sci. Maringá**, v. 30, n. 4, p. 379-390, 2008.
- GAMON, J. A.; SERRANO, L.; SURFUS, J.S., “The photochemical reflectance index: an optical indicator of photosynthetic radiation use efficiency across species, functional types, and nutrient levels”. **Oecologia**, vol. 112, pp. 492-501, 1997.
- GREEN, A.A.; BERMAN, M. ; SWITZER, P. ; CRAIG, M.D. A transformation for ordering multispectral data in terms of image quality with implications for noise removal. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 26, n. 1, p.65-74, 1988.
- HENRIQUES, L. M. P.; WUNDERLE JR, J. M.; OREN, D. C.; WILLIG, M. R. Efeitos da Exploração Madeireira de Baixo Impacto sobre uma Comunidade de Aves de Sub-bosque na Floresta Nacional do Tapajós, Pará, Brasil. **Acta Amazônica**, vol. 38(2), p. 267-290, 2008.
- HUETE, A. R. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). **Remote Sensing of Environment**, v. 25, p. 295-309, 1988.
- HUETE, A. R., DIDAN, K., MIURA, T., RODRIGUEZ, E. P., GAO, X., FERREIRA, L. G. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. **Remote Sensing of Environment**, v. 83, p. 195–213, 2002.
- HUETE, A.; LIU, H. Q.; BATCHILY, K.; VAN LEEUWEN, W.J.D.A. A comparison of vegetation indices over a global set of TM images for EOS-MODIS. **Remote Sensing of Environment**, v. 59, p. 440-451, 1997.
- IBAMA (Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis). **Floresta Nacional do Tapajós - Plano de Manejo**. IBAMA, Belterra, Pará. 373p, 2004.
- JIANG, Z.; HUETE, A. R.; DIDAN, K.; MIURA, T. Development of a two-band enhanced vegetation index without a blue band. **Remote Sensing of Environment**, v.112, p. 3833-3845, 2008.
- RAHMAN, A.F.; GAMON, J.A.; FUENTES, D.A.; ROBERTS, D.; PRENTISS, D.; QIU, H. Modeling CO₂ flux of boreal forests using narrow-band indices from AVIRIS imagery. In: AVIRIS Workshop. Proceedings. **Anais...** JPL/NASA, Pasadena, Califórnia, 2000.
- ROUSE, J. W.; HAAS, R.H., SCHELL, J.A.; DEERING, D.W., “Monitoring Vegetation Systems in the Great Plains with ERTS”. In: Proceeding of ERTS-1 Symposium. **Anais...** NASA, United States, n. 3. p. 309-317, 1973.
- VELOSO, H.P.; RANGEL FILHO, A.L.R.; LIMA, J.C.A. **Classificação da vegetação brasileira, adaptada a um sistema universal**. Rio de Janeiro: IBGE, 123p, 1991
- YU, C. M. **Seqüestro florestal de carbono no Brasil – Dimensões políticas, socioeconômicas e ecológicas**. 2004. 293 p. Tese (Meio Ambiente e Desenvolvimento), Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2004.