

ANÁLISES ESPECTRAIS DA VEGETAÇÃO COM DADOS HYPERION E SUA RELAÇÃO COM A CONCENTRAÇÃO E O FLUXO DE CO₂ EM DIFERENTES AMBIENTES NA AMAZÔNIA BRASILEIRA

Spectral analysis of vegetation with Hyperion data and his relationship with the concentration and the flux of CO₂ in different environments in the Brazilian Amazon

SUZY CRISTINA PEDROZA DA SILVA

GUSTAVO MACEDO DE MELLO BAPTISTA

Programa de Pós-Graduação em Geociências Aplicadas

Instituto de Geociências

Universidade de Brasília – UnB/IG

Email: suzyycris@unb.br; gmbaptista@unb.br

Resumo:

A modelagem espectral é uma das ferramentas importantes para a determinação de estimativa de parâmetros biofísicos de um local. Correlacionar a concentração e o fluxo de dióxido de carbono, por meio de medições indiretas é um grande avanço na área das geociências. A metodologia desenvolvida para o sequestro florestal de carbono CO₂flux, CO₂fluxEVI e CO₂fluxEVI₂, a partir do sensor Hyperion envolveu ambientes naturais e antrópicos, tornando-o eficaz quando associada à variabilidade de ecótipos existentes na Amazônia Brasileira. Resultados desse estudo apontaram que os índices NDVI, EVI e EVI₂ podem compor a estrutura do índice de sequestro florestal de carbono, CO₂flux. Entretanto, fez-se necessário avaliar a potencialidade e comparação dos índices em relação à detecção do sequestro florestal de carbono, associado as medições diretas de CO₂ nas torres micrometeorológicas. Após o processamento das imagens hiperespectrais e análises estatísticas dos índices sugeridos pôde-se inferir que o CO₂flux com a utilização do NDVI tem melhor ajustamento, quando associado aos dados de concentração de CO₂ (ppm) medidos no topo das torres, e com os dados de fluxo (mol.m⁻².s⁻¹), uma vez que as correlações possuem similaridades e são estatisticamente significativos com os dados do sensor Hyperion.

Palavras-chave: imagem hiperespectral, sequestro florestal de carbono, torres micrometeorológicas.

Abstract:

The spectral modeling is one of the important tools for determining biophysical parameters estimation of a location. Correlate the concentration and carbon dioxide flux through indirect measurements is a large advance in the field of geosciences. The methodology developed for forest carbon sink CO₂flux, CO₂fluxEVI and CO₂fluxEVI2 from Hyperion involving natural and anthropic environments, making it effective when associated with variety of ecotypes existing in the Brazilian Amazon. Results of this study showed that NDVI indices, EVI and EVI2 could compose the rate structure of the forest sink of carbon, CO₂flux. However, it was necessary to evaluate the potential and comparison of ratios in relation to detection of forest carbon sink associated to the direct measurements of CO₂ in micrometeorological towers. After processing the hyperspectral imaging and statistical analysis of the suggested ratios, it could be inferred that CO₂flux has a better adjustment when using NDVI, when associated to CO₂ (ppm) concentration data measured from the top of the towers, as well as the data flux (mol.m⁻².s⁻¹), since the correlations have similarities and are statistically significant at the Hyperion data.

Keywords: hyperspectral image, forest sink of carbon, micrometeorological towers.

1. Introdução

Os índices espectrais, em sensoriamento remoto, são informações bastante utilizadas para o monitoramento de diferentes ambientes na superfície terrestre. Para a vegetação, diversos índices têm sido propostos. Estes utilizam especialmente as regiões do visível e infravermelho próximo (Ponzoni; Shimabukuro, 2010), baseando-se no fato de que a energia refletida nessas regiões do espectro é diretamente relacionada à atividade fotossintética da vegetação.

De modo geral, o índice de vegetação NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*), desenvolvido por Rouse et al. (1973), é o mais sensível à presença de clorofila no processo de fotossíntese (Huete et al., 1997), entretanto, tem sua eficiência diminuída quando o alvo possui elevada biomassa de vegetação devido ao fenômeno de saturação (Carlson; Ripley, 1997; Huete, 1988; Huete et al., 2002). Assim, nesse estudo foram utilizados também os índices, de vegetação melhorado ou realçado EVI - *Enhanced Vegetation Index* (Huete et al., 1997) e o EVI2 - *Enhanced Vegetation Index 2* (Jiang et al., 2008).

O 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 (Huete et al., 1997). Porém, a banda do azul, utilizada no EVI, apresenta relação sinal/ruído muito baixa, não se encontra em muitos sistemas sensores e nesse caso, Jiang et al. (2008) desenvolveram um novo índice de vegetação, baseado no EVI, mas sem a banda do azul, denominado de EVI2. De acordo com Jensen (2009), o EVI é um NDVI que possui na sua estrutura um fator de ajuste para o solo e coeficientes que descrevem o uso da banda azul para a correção da banda vermelha, quanto ao espalhamento atmosférico por aerossóis. Todavia, muitos sensores não operam na região espectral do azul. Isso implica que o EVI possui uma limitação de aplicabilidade para alguns sensores que não operam na região do azul e pode ser difícil comparar estatisticamente resultados desse índice com outros índices de vegetação, a partir do sensor Hyperion.

Para Jiang et al. (2008) a alternativa estratégica para o desenvolvimento do EVI2 era decompor a equação EVI original para eliminar a banda azul, assumindo que reflectância na banda azul, pode ser expressa como uma função na banda vermelha. No seu estudo, o EVI2 foi desenvolvido com base em dados do sensor MODIS e para outros sensores com diferentes funções de resposta

espectral vermelho ou azul, pode ser diferente, por isso a relação entre EVI e EVI2 pode variar ligeiramente de um sensor para outro.

Desde a década de 80, estudos que envolvem sensoriamento remoto por meio dos índices de vegetação e CO₂ eram desenvolvidos em diferentes ecossistemas terrestres. Box, Holben e Kalb (1989) utilizando o sensor AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) sobrepuseram mensurações diretas de dados de fluxo de CO₂ e o NDVI, os autores ressaltaram que a relação entre as variáveis era baixa, devido aos efeitos da sazonalidade e da sensibilidade do saldo líquido de CO₂ encontrados em determinadas partes no mundo.

Rahman et al. (2000) propuseram um novo índice, denominado de CO₂flux, para medir a eficiência do processo de sequestro de carbono pela vegetação. No seu estudo, utilizando imagens do sensor AVIRIS (Airborne Visible InfraRed Imaging Spectrometer) numa floresta boreal com povoamento florestal e solos relativamente homogêneos, na região central do Canadá (Estados Unidos), os autores alcançaram resultados satisfatórios com uma alta correlação entre o CO₂flux com dados de fluxo de CO₂ de seis torres micrometeorológicas. Posteriormente, Baptista (2003) apresentou resultados satisfatórios com a aplicação do CO₂flux para mensurar a eficiência do processo de sequestro de carbono pela vegetação na fase clara da fotossíntese.

Recentemente, com o advento dos sensores hiperespectrais, análises minuciosas sobre as propriedades dos alvos ou materiais vem sendo estudados com maior eficiência, representando atualmente uma nova abordagem com relação às técnicas de sensoriamento remoto (Carvalho Júnior et al., 2002).

Os sensores hiperespectrais, por possuir em alta dimensionalidade espectral, fornecem uma diversidade de informações sobre a estrutura e propriedades bioquímicas e fisiológicas, concentrações de nutrientes, pigmento, FPAR e utilização da eficiência da luz (Asner et al., 2005).

No Brasil, a aplicabilidade das imagens hiperespectrais do sensor Hyperion vem avançando gradativamente. Muitos autores utilizam as imagens do sensor, a fim de verificar o potencial para analisar diversas feições, inclusive as de vegetação e CO₂ (Galvão et al., 2005; Schramm; Vibrans, 2007) e Souza, 2009).

Dessa forma, esse estudo analisou a concentração e o fluxo de dióxido de carbono, a partir das torres de medições micrometeorológicas instaladas na Amazônia Brasileira, correlacionando-as com as análises espectrais da vegetação a partir de imagens Hyperion.

2. Material e métodos

2.1 Área de estudo

O estudo foi realizado na região amazônica, envolvendo áreas naturais e de influências antrópicas, onde estão localizadas as torres micrometeorológicas do LBA (Large Scale Biosphere-Atmosphere Experiment in Amazonia). As cinco torres do estudo são denominadas de K34, K83, K67, FNS e SIN (Figura 1).

A torre K34, localiza-se em ambiente de floresta primária a cerca de 60 km ao norte de Manaus, pela rodovia BR 174. As torres K83 (exploração seletiva de madeira) e K67 (floresta primária) localizadas em Santarém (PA) foram instaladas na Floresta Nacional do Tapajós a aproximadamente 5 e 6 km, respectivamente de distância, em linha reta da rodovia BR-163. A Torre FNS (pastagem) está localizada na Fazenda Nossa Senhora no município de Ouro Preto d'Oeste nas proximidades da rodovia BR-163, a cerca de 50 km de Ji-Paraná, na região sudoeste

de Rondônia. A torre SIN localiza-se a aproximadamente 50 km nordeste de Sinop (MT), sua cobertura vegetal é caracterizada por uma Floresta de Transição Amazônia Cerrado.

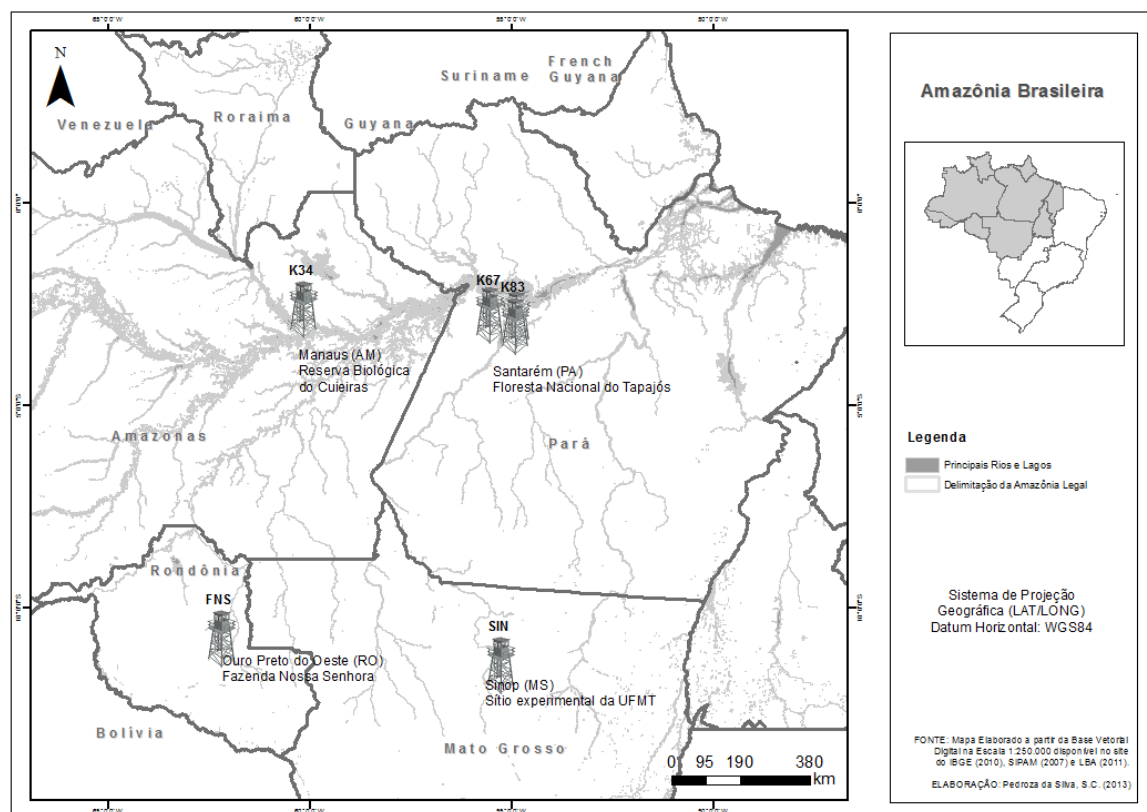


Figura 1: Localização das cinco torres micrometeorológicas na Amazônia Brasileira.

Os sítios experimentais do Amazonas e Pará estão inseridos em Unidades de Conservação e as torres de Rondônia e Mato Grosso estão sob a responsabilidade da Universidade de Rondônia, no Campus de Ji-Paraná e da Universidade Federal do Mato Grosso, respectivamente (Tabela 1).

Tabela 1: Torres de Fluxo de CO₂ na Amazônia Brasileira.

N.º de Torre	Estado	Município	Localidade	Sítios	Nome da Torre	Coordenadas Geográficas (decimal)	
						Latitude (S)	Longitude (W)
1	Amazonas	Manaus	Reserva Biológica do Cuieiras	Floresta Primária	K34	2,60900	60,20910
2	Pará	Santarém	Floresta Nacional do Tapajós	Exploração Seletiva de Madeira	K83	3,01806	54,96889
3			Floresta Nacional do Tapajós	Floresta Primária	K67	2,85611	54,95806
4	Rondônia	Ouro Preto do Oeste	Fazenda Nossa Senhora	Pastagem	FNS	10,7500	62,26000

N.º de Torre	Estado	Município	Localidade	Sítios	Nome da Torre	Coordenadas Geográficas (decimal)	
						Latitude (S)	Longitude (W)
5	Mato Grosso	Sinop	Sítio experimental da UFMT	Floresta de Transição (Floresta Úmida e Cerrado)	SIN	11,41230	55,32470

2.2 Pré-processamento das imagens Hyperion

Neste estudo foram utilizadas 21 imagens hiperespectrais, sendo para a torre K34 (5 cenas), K8 (8 cenas), K67 (5 cenas), FNS (2 cenas) e SIN (1 cena) obtidas pelo sensor Hyperion, instalado no satélite EO-1 (Earth Observing-1) da NASA. Cada imagem possui 242 bandas, nos comprimentos de onda de 0,4 a 2,5 μm e sua resolução espacial é de 30 metros, com largura de 7,5 km.

Como o sensor Hyperion opera a partir de uma plataforma orbital com conseqüente relação sinal ruído moderado e, devido aos efeitos atmosféricos, o processamento dos dados demanda um cuidado maior (DATT et al., 2003), foram realizados primeiramente, a conversão de ND (Número Digital) para radiância, a correção atmosférica e a minimização dos ruídos na imagem.

A determinação do CO₂flux nas imagens do Hyperion foi realizada mediante o reescalonamento dos valores ND das imagens de radiância. Para extração da informação referente ao CO₂flux, utilizou-se as bandas calibradas no VNIR (8-57), que foram multiplicadas por 40 (EO-1 USER GUIDE, 2003). Os dados foram convertidos mediante a ferramenta band math do ENVI.

A correção dos efeitos atmosféricos foi realizada utilizando o modelo de transferência radiativa MODTRAN, com o aplicativo FLAASH (Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes). Os dados de latitude e longitude, hora de obtenção da imagem, altitude do sensor de 705km, visibilidade inicial de 40km e informações dos sítios experimentais das torres micrometeorológicas na região amazônica foram utilizados para alimentação do FLAASH. Os parâmetros do modelo incluíram uma atmosfera tropical com um modelo de aerossol rural, com concentração média de CO₂ na atmosfera de 390ppm, e as altitudes do terreno foram verificadas a partir de cada sítio experimental. Assim para a torre K34 (130m), K83 (150m), K67 (90m), FNS (150m) e SIN (280m).

Embora as imagens hiperespectrais forneçam um espectro contínuo, gera-se uma grande quantidade de dados necessários para o processamento, influenciando na demanda computacional. Além de possuir bandas estreitas contíguas, grande parte dos dados do espectro é redundante, assim como sua suscetibilidade às interferências de ruídos, o que dificulta a identificação e a análise de materiais. Neste estudo foi aplicado o método MNF (Minimum Noise Fraction). O método MNF foi desenvolvido para eliminar a alta correlação com o mínimo de perda de informação, num princípio estatístico de redução de dados, tornando evidentes feições que não eram percebidas visualmente. Carvalho Júnior et al. (2002) afirmam que as imagens geradas com o processo de inversão do método de MNF apresentam espectros límpidos de ruído, pois as primeiras bandas compõem cerca de 90% das informações, e o restante são ruídos.

Para o georreferenciamento foram utilizados os coeficientes da função de mapeamento polinomial de primeira ordem e estimados por meio de um conjunto de pontos que foram

registrados tendo como referência a imagem de nível 1Gst Geotiff da United States Geological Survey (USGS) referentes as localizações de cada área, conduzidos no programa ENVI 4.8.

2.3 Determinação do fluxo de CO₂ por índices espectrais

O índice CO₂flux (RAHMAN et al., 2000) mede a eficiência do processo de sequestro de carbono pela vegetação. Para sua determinação é utilizada a integração do NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) com o sPRI (Photochemical Reflectance Index reescalado para valores positivos). O NDVI utiliza as bandas do vermelho e do infravermelho num processo de diferença normalizada pela soma, que visa representar percentualmente a relação de uma banda com outra. Essa operação aritmética permite uma clara distinção das áreas com vegetação, devido a relação da absorção na faixa do vermelho e o pico de reflectância na faixa do infravermelho próximo, o que permite a medição da intensidade da banda de absorção ou feição espectral. O índice NDVI (Equação 1) consiste na razão da diferença de reflectância entre a feição de absorção do vermelho (0,66 μm) e o aumento de albedo que ocorre nos espectros de vegetação após o início do infravermelho próximo (0,8 μm).

$$NDVI = \frac{R_{0,800} - R_{0,660}}{R_{0,800} + R_{0,660}} \quad (1)$$

Em que: R é o valor de reflectância em cada comprimento de onda, ajustado para os dados Hyperion.

O PRI (Equação 2) é a razão da diferença existente entre a feição de absorção no azul (0,531 μm) e o pico de reflectância do verde (0,57 μm) e pode ser correlacionado com a eficiência da luz na fotossíntese (GAMON, SERRANO e SURFUS, 1997).

$$PRI = \frac{R_{0,531} - R_{0,57}}{R_{0,531} + R_{0,57}} \quad (2)$$

Em que: R é o valor de reflectância em cada comprimento de onda, ajustado para os dados Hyperion.

Entretanto, o PRI precisa de um reescalamento de seus valores evitando dados negativos sendo denominado de sPRI (Equação 3). O reescalamento para valores positivos é necessário para normalizar os dados de “verdor” da vegetação. O sPRI é obtido por meio do PRI, adicionando uma unidade e dividindo o resultado por dois.

$$sPRI = (PRI + 1)/2 \quad (3)$$

A determinação do índice CO₂flux é realizada pela multiplicação, no módulo Band Math, dos planos de informação NDVI e sPRI.

Como proposto para minimização dos efeitos de saturação gerados pela presença do NDVI, foram analisados também, os índices (EVI e EVI2), para compor a estrutura do CO₂flux, gerando os índices CO₂fluxEVI e CO₂fluxEVI2.

O índice de vegetação melhorado ou realçado, EVI, (Equação 4) emprega as bandas espectrais do infravermelho próximo, região do vermelho e a reflectância na faixa do azul é utilizada para indicar o vigor vegetativo (Huete, 1997).

$$EVI = G \frac{N-R}{N + C_1R - C_2B + L} \quad (4)$$

Em que: N, R e B = reflectância do infravermelho próximo, vermelho e azul; C₁ = coeficiente de ajuste para efeito de aerossóis da atmosfera no vermelho = 6; C₂ = coeficiente de ajuste para

efeito de aerossóis da atmosfera no azul = 7,5; L = fator de ajuste para o solo = 1; e G = fator de ganho = 2,5

O EVI2 (Equação 5) é funcionalmente equivalente ao EVI, embora, seja ligeiramente mais propenso a ruído de aerossol mas, com os avanços contínuos das técnicas de correções atmosféricas, essa evidência tornar-se menos significativa ao longo do tempo (JIANG et al., 2008).

$$EVI2 = 2,5 \frac{(N - R)}{N + 2,4R + 1} \quad (5)$$

Em que: N e R = reflectância do infravermelho próximo e vermelho.

2.4 Aquisição dos Dados Micrometeorológicos

Os dados de campo são referidos ao período de 2000 a 2005 e solicitados junto aos escritórios locais do Programa LBA. As visitas às torres foram realizadas entre os meses de agosto a outubro de 2013, com o auxílio dos pesquisadores, professores, estudantes e técnicos de Instituições que são vinculados às pesquisas realizadas em cada torre.

Os sítios experimentais das torres utilizam o sistema *Eddy Covariance* para medir as trocas de CO₂ e a atmosfera. É um sistema que mede as três componentes da velocidade do vento (velocidade horizontal do vento a leste, velocidade horizontal do vento a norte e a velocidade vertical do vento) e a temperatura do ar, e o intervalo de tempo utilizado no cálculo das médias e flutuações dos sinais turbulentos são de 30 minutos (Aguilar et al., 2006).

A concentração média de CO₂ nas torres micrometeorológicas pesquisadas são medidos com grande acurácia por um analisador de gás infravermelho, comumente conhecido como IRGA (InfraRed Gas Analyzers). O analisador de gás de caminho aberto modelo (LI-7500, LI-COR, Inc.), é um instrumento utilizado para realizar medidas simultâneas das concentrações de CO₂ e vapor d'água na atmosfera. Os dados também podem ser acessados na Rede FLUXNET (fluxnet.ornl.gov). Os dados de CO₂ são mantidos na frequência de 30 minutos para permitir o processamento de dados padronizados.

O perfil de concentração de CO₂ foi verificado pelos instrumentos instalados em diferentes alturas, ao longo das torres e para obter a informação necessária para a análise, as médias dos dados foram extraídas e associados às medidas espectrais na data e horário da passagem do sensor Hyperion.

3. Resultados e discussão

3.1 Modelagem hiperespectral do sequestro florestal de carbono

Como as torres micrometeorológicas estão localizadas em diferentes ambientes na Amazônia (floresta primária, exploração seletiva de madeira e pastagem) fez-se necessária a verificação de qual índice (NDVI, EVI e EVI2) aplicar, para verificação do sequestro florestal de carbono.

Na tabela 2, observa-se que nas florestas primárias (K34, K67 e SIN) e na área de exploração seletiva de madeira (K83), os valores de NDVI são elevados, mantendo uma média em torno de 0,820, com pequenas variações, devido as épocas do ano que foram medidos (chuvosa e seca). Na área de pastagem (FNS), a variação do NDVI foi mais intensa, alcançando uma diferença de

amplitude de aproximadamente 0,514, com valores médios de 0,306. Isso pode ser explicado, devido às condições ambientais encontradas nos pontos amostrados. As áreas de pastagens são áreas mais secas, com maior carência de água, diferentemente das florestas primárias, devido uma quantidade maior de biomassa. Esses valores de NDVI são relacionados ao valor de um pixel da imagem Hyperion.

Os resultados da tabela 2 corroboram com os resultados de Nascimento (2012), os valores encontrados mostram que nas florestas primárias o NDVI oscilam em torno de 0,888. Trata-se de regiões com uma quantidade maior de conteúdos de água do solo e da biomassa verde, enquanto que na área de pastagem a variação do NDVI é mais drástica, alcançando uma diferença de aproximadamente 0,3, com valores máximos e mínimos de 0,736 e 0,443. A explicação foi a intensificação da seca que afetou o crescimento da pastagem, ou também por estar relacionado às atividades de queimadas na área, que reduzem drasticamente os valores de NDVI.

Os dados representados na tabela 2 mostram que o índice NDVI possui os maiores valores no pixel em relação aos outros dois índices EVI e EVI2. Apesar de apresentar alguns valores baixos, uma vez que os dados das cinco torres divergem na localização, nos tipos de ambientes e datas, não houve valores negativos em nenhum dos índices.

Tabela 2: Valores de NDVI para os pontos das torres.

Torre	Cenas do Sensor	Época do Ano	NDVI
K34 (Floresta Primária)	2002 219	Seca	0.860
	2002 226	Seca	0.890
	2002 315	Seca	0.844
	2003 174	Chuvosa	0.859
	2005 218	Seca	0.910
K83 (Exploração Seletiva de Madeira)	2001 211	Chuvosa	0.859
	2001 227	Seca	0.778
	2001 307	Seca	0.831
	2002 189	Chuvosa	0.853
	2002 221	Seca	0.886
	2003 137	Chuvosa	0.724
	2003 185	Chuvosa	0.859
	2003 233	Seca	0.879
K67 (Floresta Primária)	2002 189	Chuvosa	0.850
	2002 269	Seca	0.892
	2002 285	Seca	0.733
	2003 233	Seca	0.864
	2005 206	Chuvosa	0.869
FNS (Pastagem)	2003 220	Seca	0.319
	2003 236	Seca	0.294
SIN (Floresta de Transição Amazônia-Cerrado)	2002 191	Seca	0.850

A média do NDVI nas cinco torres apresenta valores em torno de 0,795 (com desvio padrão de 0,169). Apesar do EVI e EVI2 apresentarem as mesmas tendências, os valores de EVI2 com média de 0,444 (com desvio padrão de 0,114), e EVI com média de 0,416 (com desvio padrão de 0,111). Esses últimos dois índices apresentam valores menores do que aqueles verificados no

índice NDVI, para os mesmos dias observados. O coeficiente de variação de NDVI foi o mais baixo, 21,3%, enquanto que o EVI2 apresentou 25,7% e o EVI, 26,6% (Tabela 3).

Tabela 3: Estatística descritiva para os índices NDVI, EVI e EVI2.

ATRIBUTOS	Índices de Vegetação		
	NDVI	EVI	EVI2
Tamanho da amostra	21	21	21
Mínimo	0.294	0.173	0.194
Máximo	0.910	0.548	0.576
Média	0.795	0.416	0.444
Variância	0.029	0.012	0.013
Desvio Padrão	0.169	0.111	0.114
Erro Padrão	0.037	0.024	0.025
Coeficiente de Variação	21.3%	26.6%	25.7%

Na figura 2, é possível verificar a saturação do NDVI em relação aos índices EVI e EVI2, que possuem valores no pixel mais baixos. Os valores de NDVI para as áreas de florestas primárias e com intervenção (K34, K67, K83 e SIN) são elevados, com média em torno de 0,847, com elevada concentração de biomassa, indicando o fenômeno de saturação. O comportamento se mantém em relação ao valores de EVI e EVI2 para as mesmas áreas de floresta.

Os índices melhoram a capacidade de detecção em regiões com maiores densidades de biomassa, uma vez que reduz a influência do sinal do solo e da atmosfera sobre a resposta do dossel da floresta, que pode ser observado nas médias do índice EVI, em torno de 0,440, e EVI2 em torno de 0,468. Na área da torre FNS, com áreas abertas e vegetação mais seca, tanto o NDVI quanto os índices EVI e EVI2 apresentaram valores baixos, com médias de 0,306; 0,194 e 0,215, respectivamente.

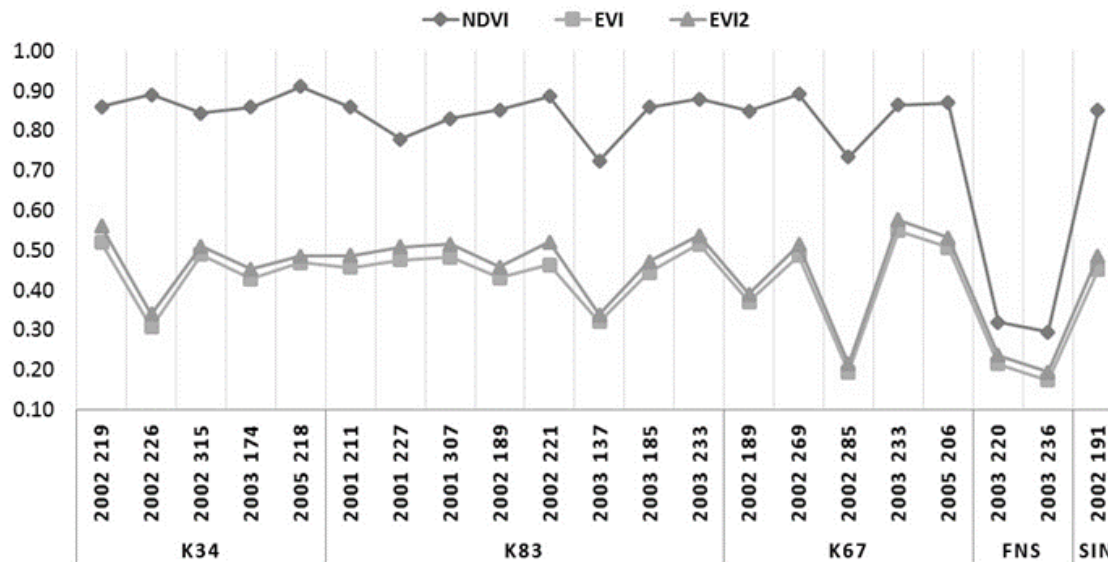


Figura 2: Comportamento dos índices de vegetação NDVI, EVI e EVI2 do sensor Hyperion nas torres.

O comportamento observado permite inferir que, para analisar o sequestro florestal de carbono em áreas de floresta, os melhores resultados foram obtidos com os índices EVI e EVI2. Além disso, pode-se afirmar que em áreas com menor densidade vegetal, qualquer um dos índices testados (NDVI, EVI e EVI2) apresentam bons resultados.

Nas análises estatísticas, o EVI respondeu tão bem quanto o EVI2 nos pontos de localização das torres. Dessa forma, pode-se adotar na estrutura do modelo de sequestro florestal de carbono, tanto um índice quanto, o outro. Para fins de comparação com outros índices espectrais de vegetação, seria mais interessante utilizar o EVI2.

Ao adotar o NDVI como variável independente e os demais índices (EVI e EVI2) como variáveis dependentes, pode-se dizer que existe correlação positiva de grau forte ($r=0,762$), entre os índices. O coeficiente de determinação foi 0,581 para o EVI e 0,582 para o EVI2 (Figura 3).

Na análise espectral obtidos, a partir do pixel de localização das torres micrometeorológicas, a correlação entre os índices NDVI e (EVI e EVI2) foi $r=0,7622$. O teste de hipótese indicou uma correlação estatisticamente significativa com uma confiança de 95%.

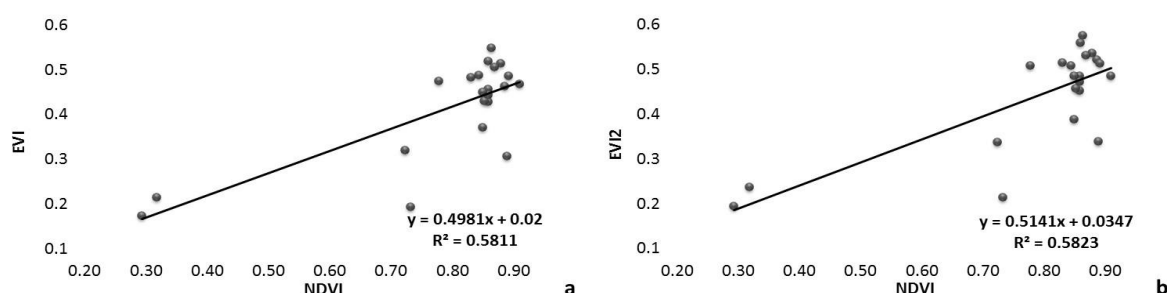


Figura 3: Relação linear entre os índices de vegetação NDVI com os índices a) EVI e b) EVI2.

3.2 Análise pontual do sequestro florestal de carbono com CO₂flux, CO₂fluxEVI e CO₂fluxEVI2

Os resultados fazem referência às relações estatísticas entre as informações obtidas com a aplicação dos índices espectrais (CO₂flux, CO₂fluxEVI e CO₂fluxEVI2) e as informações de campo da concentração (ppm) e fluxo ($\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$) de CO₂.

A análise de regressão das variáveis verificadas a partir do coeficiente de determinação ajustou os modelos CO₂flux, CO₂fluxEVI e CO₂fluxEVI2, a uma função não-linear com distribuição polinomial. De acordo com Milone (2004), essa função é perfeitamente aceita, quando o conjunto de dados não se ajustam a uma reta, assim, convém testar as funções não-lineares, de grau maior que um.

Para averiguar a normalidade dos dados, utilizou-se o teste estatístico de Shapiro-Wilk ou teste W (Tabela 4). Pela regra de decisão, o teste de normalidade para a maioria das variáveis analisadas ao nível de significância de 5% não apresentaram normalidade na sua distribuição. Dessa forma, para análises estatísticas foram utilizados também, os testes não paramétricos, uma vez que, as amostras nesse estudo são relativamente pequenas, devido insuficiência de dados coincidentes entre as variáveis espectrais e as obtidas em campo.

Tabela 4: Teste de Normalidade de Shapiro-Wilk.

Teste de Normalidade de Shapiro-Wilk		N	W _{CAL}	P
	CO ₂ flux	21	0.5431	0.0062
	CO ₂ fluxEVI	21	0.8696	0.0100
	CO ₂ fluxEVI2	21	0.8659	0.0099
1 hora	Perfis de CO ₂	21	0.8319	0.0095
	CO ₂ no topo da Torre	21	0.9567	0.4639
2 horas	Perfis de CO ₂	21	0.8052	0.0092
	CO ₂ no topo da Torre	21	0.8052	0.0092

A análise estatística que avalia o modelo com melhor ajuste para a verificação do sequestro florestal de carbono, tomando as áreas que correspondem as coordenadas geográficas das torres micrometeorológicas, com leitura de 1 pixel na imagem Hyperion, são explicados numa associação não-linear com os dados de concentração e fluxo de CO₂ obtidos nas torres.

3.2.1 Médias de perfis de concentração de CO₂ (ppm) ao longo da torre

O melhor ajuste com os dados analisados ao longo da torre foi verificado entre o CO₂flux e a concentração de CO₂ (ppm), que apresentou coeficiente de determinação 0,5077 para as observações a cada 2 horas. Quanto aos modelos, CO₂fluxEVI e CO₂fluxEVI2, o ajustamento da curva apresentou coeficientes de determinação 0,3409 e 0,3084, para as observações a cada 1 hora, respectivamente (Figura 4).

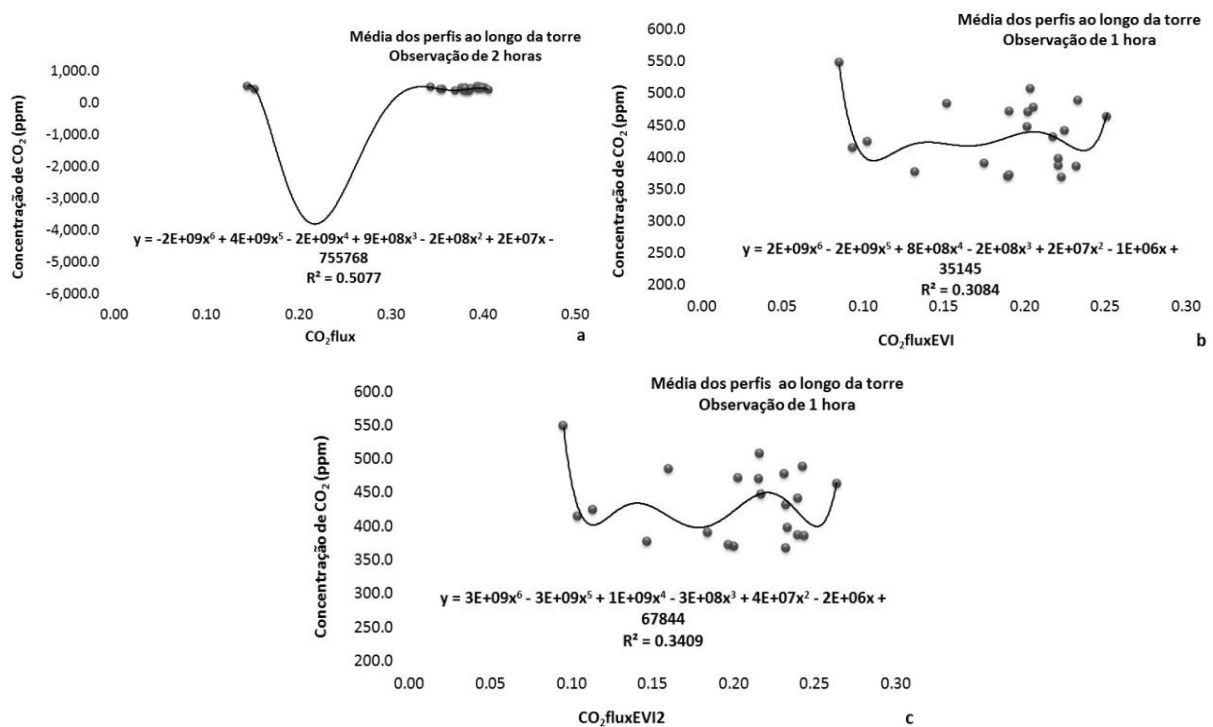


Figura 4: Ajustes dos modelos CO₂flux, CO₂fluxEVI e CO₂fluxEVI2, com a concentração (ppm) ao longo das torres.

3.2.2 Médias de perfis de concentração de CO₂ (ppm) no topo das torres

De acordo com os resultados analisados no topo das torres foi possível verificar que o CO₂flux se relaciona melhor com a concentração de CO₂ a cada 2 horas de observação, onde foi verificado o melhor ajustamento da curva, com os coeficientes de determinação 0,62. Os resultados entre os modelos CO₂fluxEVI e CO₂fluxEVI2 foram similares, apresentando coeficientes de determinação 0,4798 para CO₂fluxEVI e 0,4692 para o CO₂fluxEVI2 (Figura 5).

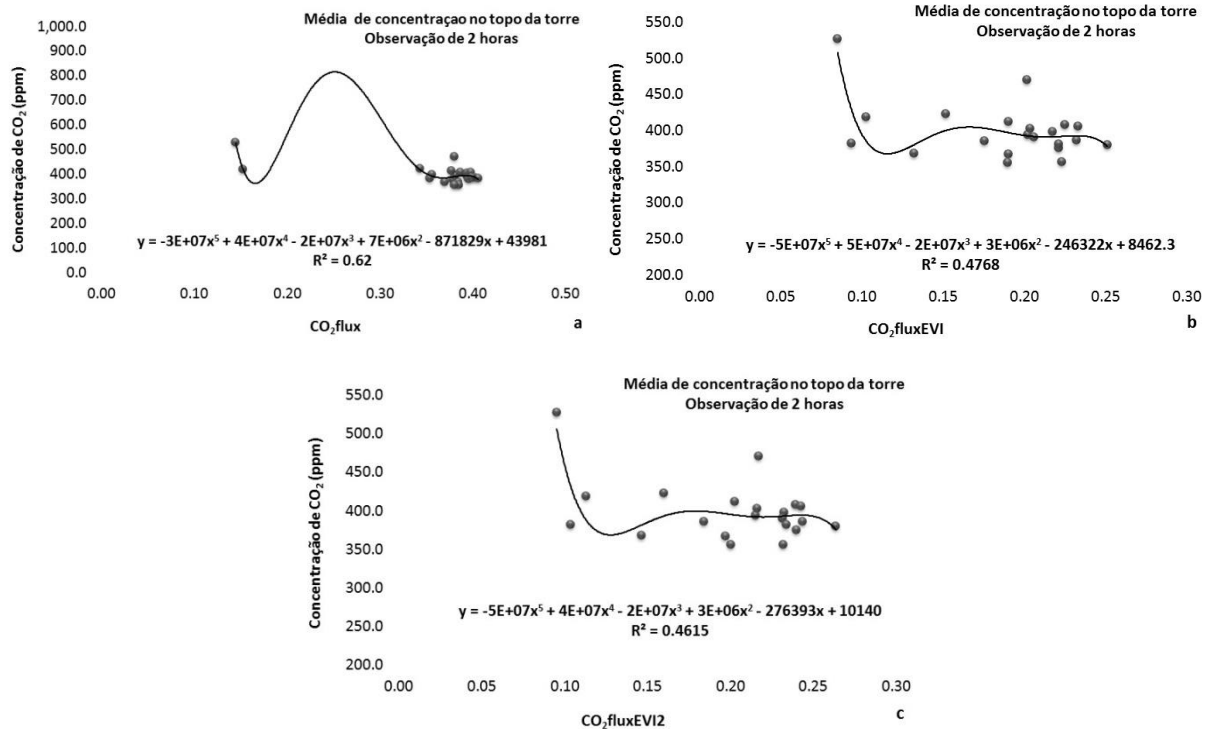


Figura 5: Ajustes do CO₂flux, CO₂fluxEVI e CO₂fluxEVI2 com a concentração (ppm) no topo das torres.

3.2.3 Fluxo de CO₂ (mol.m⁻².s⁻¹) com os índices de sequestro de carbono

Na modelagem para observações obtidas com médias a cada 2 horas verificou-se que o CO₂flux apresenta ajustamento melhor com os dados de fluxo (mol.m⁻².s⁻¹), apresentando coeficiente de determinação 0,8673, com relação aos outros dois modelos CO₂fluxEVI e CO₂fluxEVI2, cujos coeficientes de determinação foram, respectivamente, 0,5907 e 0,5749 (Figura 6).

Na relação entre modelagem de sequestro florestal de carbono e dados de concentração de CO₂ (ppm), os resultados mostraram que as medidas de CO₂ no topo das torres foram mais eficientes para as associações com medidas espectrais, do que as medições de CO₂ realizadas ao longo da torre. Enquanto que, para os dados de fluxo, a melhor modelagem foi para observações cada 2 horas com CO₂flux.

As correlações entre as variáveis mensuradas foram realizadas pelos coeficientes de Pearson, de Spearman (para dados não paramétricos) e pela correlação canônica.

Pela matriz de correlação de Pearson pode-se inferir que o CO₂flux, mesmo apresentando o problema de saturação, se correlaciona melhor com as medidas de CO₂ obtidas em campo. O CO₂flux apresentou uma forte correlação ($r=-0,641$) com a concentração de CO₂ (ppm) medidos no topo das torres e ($r=-0,663$) com as medidas de fluxo de CO₂ (mol.m⁻².s⁻¹), enquanto que os modelos CO₂fluxEVI e CO₂fluxEVI2 obtiveram correlações moderadas. Para todas as correlações de Pearson, o teste de hipóteses indicou que as correlações analisadas são estatisticamente significativas (Tabela 5).

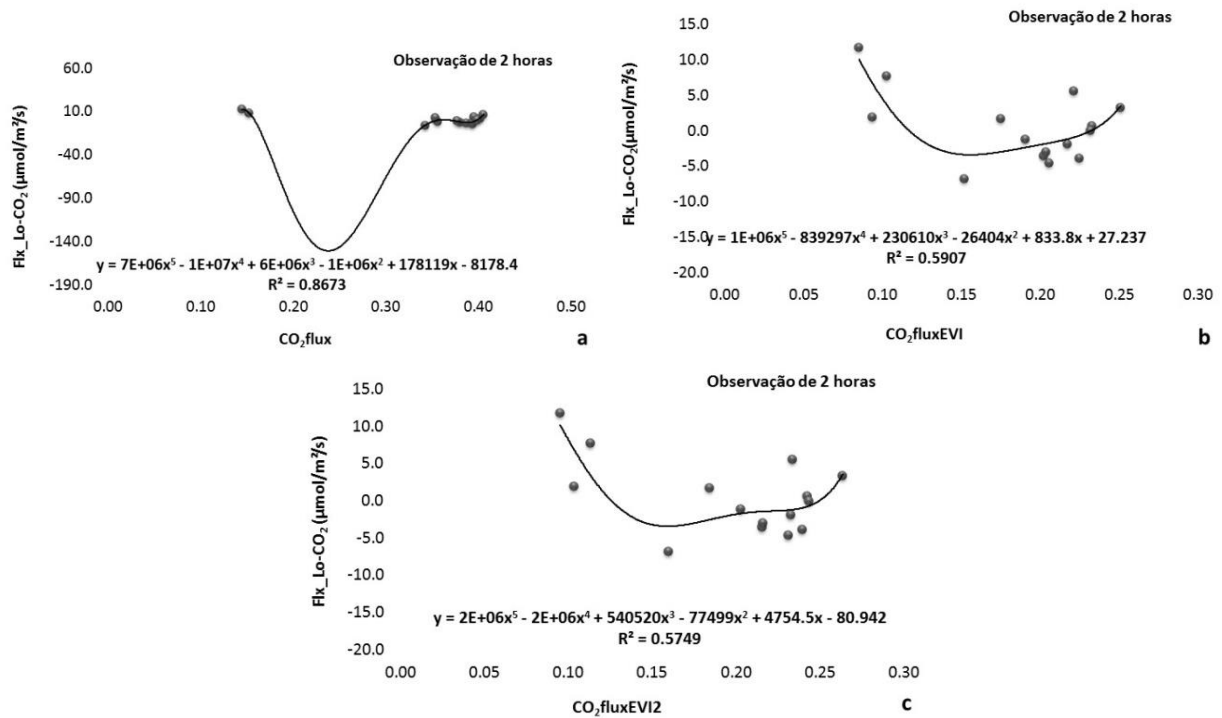


Figura 6: Ajustes do CO₂flux, CO₂fluxEVI e CO₂fluxEVI2 com dados de fluxo com média de observações de 2 horas.

Tabela 5: Matriz de Correlação de Pearson (r).

Correlação de Pearson (r)	CO ₂ flux	CO ₂ fluxEVI	CO ₂ fluxEVI2	Perfis CO ₂ (1 h)	Perfis CO ₂ (2 h)	Topo Torre (1 h)	Topo Torre (2 h)	Fluxo CO ₂ (1 h)	Fluxo CO ₂ (2 h)
CO ₂ flux	1.00								
CO ₂ fluxEVI	0.730	1.00							
CO ₂ fluxEVI2	0.729	0.997	1.00						
Perfis CO ₂ (1 h)	-0.343	-0.151	-0.135	1.00					
Perfis CO ₂ (2 h)	-0.220	-0.059	-0.057	0.888	1.00				
CO ₂ no Topo Torre (1 h)	-0.599	-0.342	-0.337	0.614	0.690	1.00			
CO ₂ no Topo Torre (2 h)	-0.641	-0.417	-0.407	0.727	0.683	0.924	1.00		
Fluxo CO ₂ (1 h)	-0.637	-0.424	-0.438	-0.053	-0.115	0.413	0.432	1.00	
Fluxo CO ₂ (2 h)	-0.663	-0.470	-0.483	-0.008	-0.058	0.474	0.483	0.951	1.00

As correlações descritas pelo coeficiente de Pearson são negativas, de grau forte entre as variáveis CO₂flux e as medidas de CO₂ nas torres micrometeorológicas. Assim, quanto maior for a atividade fotossintética medida pelo CO₂flux, menor é a concentração (ppm) e a intensidade de fluxo (mol.m⁻².s⁻¹) de CO₂ tende a ser negativa na camada atmosférica próxima das torres.

Os modelos ajustados para os dados de concentração (ppm) indicam que 64% da variação observada de CO₂flux, 41% de CO₂fluxEVI e 40% de CO₂fluxEVI2 são explicados pela quantidade de CO₂ absorvido pela vegetação no momento da passagem do sensor Hyperion, padronizados com média de intervalos a cada duas horas. Enquanto que, para os dados de fluxo (mol.m⁻².s⁻¹) essa variação mostra 66% de CO₂flux, 47% de CO₂fluxEVI e 48% de CO₂fluxEVI

são explicados pela intensidade de assimilação e emissão de CO₂ atmosférico, no momento da passagem do sensor, onde se encontravam as cinco torres micrometeorológicas.

Quando se analisa a correlação pelo coeficiente de Spearman (*r_s*), os resultados apontam para correlações fracas entre as variáveis, entretanto, os dados indicam que as associações são do tipo não-lineares e corroboram com os coeficientes de Pearson, indicando também correlações negativas.

Na análise de correlação canônica, as variáveis espectrais foram consideradas um grupo (Y), enquanto que as variáveis mensuradas diretamente nas torres, o outro grupo (X). Na tabela 6 verifica-se que a primeira correlação foi de R Canônico 0,8350, representando a melhor correlação possível entre qualquer combinação linear das variáveis espectrais com as variáveis de medição de CO₂ direta na torre. A estatística R Canônico expressa a magnitude do relacionamento entre os dois conjuntos de variáveis.

Tabela 6: Resultados da Correlação Canônica.

R CANÔNICO		0.8350			
Qui-quadrado (χ^2)		25.1642			
Graus de liberdade		18			
P-valor (<i>p</i>)		0.1205			
Variável Canônica	Autovalores (R ²)	Correlações canônicas	Qui-quadrado (χ^2)	GL	<i>p</i> -valor (<i>p</i>)
CO ₂ flux	0.6973	0.8350	25.1642	18	0.1205
CO ₂ fluxEVI	0.2400	0.4899	6.0446	10	0.8115
CO ₂ fluxEVI2	0.0982	0.3134	1.6536	4	0.7991

Entretanto, quando se analisa cada associação pela matriz de correlação canônica, verifica-se que as correlações são negativas e moderadas entre as variáveis e pelo menos seis associações são estatisticamente significativas (Tabela 7).

Tabela 7: Matriz de correlação entre as variáveis espectrais e as mensurações nas torres.

Correlação (<i>r_s</i>)	CO ₂ flux		CO ₂ fluxEVI		CO ₂ fluxEVI2	
Perfis de CO ₂ (1 h)	-0.342	ns	-0.151	ns	-0.134	ns
Perfis de CO ₂ (2 h)	-0.220	ns	-0.059	ns	-0.057	ns
CO ₂ no Topo da Torre (1 h)	-0.599	(<i>p</i> < 0.01)	-0.343	ns	-0.338	ns
CO ₂ no Topo da Torre (2 h)	-0.642	(<i>p</i> < 0.01)	-0.417	ns	-0.407	ns
Fluxo de CO ₂ (1 h)	-0.637	(<i>p</i> < 0.01)	-0.400	ns	-0.414	ns
Fluxo de CO ₂ (2 h)	-0.660	(<i>p</i> < 0.01)	-0.443	(<i>p</i> < 0.01)	-0.456	(<i>p</i> < 0.01)

ns = não significativo

Resultados similares de CO₂flux foram encontrados por Rahman et al. (2000; 2001), entretanto os autores apresentam uma relação linear, com um valor de R² de 0,78, entre os dados de CO₂flux e o fluxo de CO₂ nas torres utilizando o sensor AVIRIS, resultando no mapeamento de fluxos fotossintéticos numa paisagem de floresta boreal. Fuentes et al. (2006) apresentaram um ajuste linear com coeficiente de determinação 0,96, entre os índices PRI e NDVI, usando o sensor AVIRIS e as medidas de fluxo de torres num ecossistema de semiárido no sul da Califórnia (Estados Unidos).

As correlações mais baixas nesse estudo, quando comparadas com os resultados de Rahman et al. (2000; 2001) e Fuentes et al. (2006) podem ser explicadas por dois fatores: tipo de sensor utilizado e a variabilidade de paisagens (naturais e antrópicas).

De acordo com Baptista (2003), as análises espectrais obtidas com o Hyperion apresentam menor coeficiente de correlação, pois são obtidos a 705 km de altitude, o que pode apresentar interferências acima da troposfera. Além disso, os espectros do AVIRIS são menos ruidosos, o que permitem correlações superiores a 85%.

Para Cerqueira e Franca-Rocha (2007) existiam diferenças significativas entre os tipos de vegetação no Bioma Caatinga, por exemplo, quando são analisadas com o CO₂flux. Wylie et al. (2007) sugerem que na pastagem são necessárias séries temporais mais longas para fornecer estimativas precisas do estado ou tendências nos fluxos de CO₂ nos ambientes.

Objetivando testar a similaridade estatística entre os modelos de sequestro florestal de carbono, aplicou-se o teste não paramétrico de Wilcoxon-Mann-Whitney ou Teste U. Na análise, verificou-se que não há diferença entre as informações obtidas a partir dos índices espectrais na imagem Hyperion e nas informações de campo de concentração (ppm) e fluxo (mol.m⁻².s⁻¹) de CO₂ medido nas torres, existindo, portanto, similaridade entre as variáveis analisadas.

Da mesma forma com os resultados encontrados nesse estudo para dados Hyperion, foram satisfatórias as similaridades entre dados espectrais do sensor MERIS e MODIS e dados de fluxo de CO₂ torres micrometeorológicas em florestas, que são apontadas no trabalho de Harris e Dash (2010). Em culturas agrícolas, também vem sendo estudados as correlações entre estoque e sequestro de carbono, que apresentaram potencialidade com uso de imagens Quickbird e Landsat (Coltri et al., 2009).

A modelagem pontual de sequestro florestal de carbono para as coordenadas geográficas onde estão localizadas as torres na Amazônia Brasileira pode ser realizada a partir do índice CO₂flux, tanto com os dados de concentração de CO₂ (ppm) medidos no topo das torres, quanto, com os dados de fluxo (mol.m⁻².s⁻¹), pois ambas associações possuem significância e similaridades estatística com os dados do sensor Hyperion.

4. Conclusões

A modelagem pontual de sequestro florestal de carbono para as áreas naturais e antrópicas, pode ser realizada pelo índice CO₂flux. Entretanto, para análises consistentes dos índices espectrais verificou-se que, as etapas que antecedem o processamento do CO₂flux, CO₂fluxEVI e CO₂fluxEVI2 são de suma importância e devem ser cuidadosamente processadas, uma vez que o sensor Hyperion possui imagens mais ruidosas, comparadas a outros sensores hiperspectrais.

As correlações entre as variáveis mensuradas são inversamente proporcionais indicando maior atividade fotossintética medida pelo CO₂flux, quando a concentração (ppm) é menor e a intensidade de fluxo (mol.m⁻².s⁻¹) é negativo na camada atmosférica.

Medidas diretas de CO₂ (ppm) no topo das torres são mais eficientes para a correlação com índices espectrais, do que as medições coletadas ao longo da torre. Contudo, os melhores ajustes para o CO₂flux foram apresentados para a associação com dados de fluxo (mol.m⁻².s⁻¹).

AGRADECIMENTOS

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Amazonas (FAPEAM), instituição financiadora. Ao Programa de Pós-Graduação do Instituto de Geociências da Universidade de Brasília (UnB), ao INPA (Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia) pela parceria junto ao Programa LBA (Large Scale Biosphere-Atmosphere Experiment in Amazonia), a Universidade Federal do Rondônia (UNIR) – Campus Ji-Paraná e ao IBAMA (Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis), no apoio logístico com dados de campo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguiar, R. G.; Randow, C. V.; Filho, N. P.; Manzi, A. O.; Aguiar, L. J. G.; Cardoso, F. L. Fluxos de massa e energia em uma floresta tropical no sudoeste da Amazônia. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 21, n. 3b, p. 248-257, 2006.
- Asner, G. P.; Carlson, K. M.; Martin, R. E. Substrate age and precipitation effects on Hawaiian forest canopies from spaceborne imaging spectroscopy. *Remote Sensing of Environment*, v. 98 p. 457-467, 2005.
- Baptista, G. M. M. Validação da modelagem de sequestro 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.
- Box, E. O.; Holben, N. B.; Kalb, V. Accuracy of the AVHRR Vegetation Index as a predictor of biomass, primary productivity and net CO₂ flux. *Vegetatio* v. 80, 71-89, 1989.
- Carlson, T. N.; Ripley, D. A. On the relation between NDVI, fractional vegetation cover, and leaf area index. *Remote Sensing of Environment*, v. 62, p. 241-252, 1997.
- Carvalho Júnior, O. A.; Carvalho, A. P. F.; Meneses, P. R.; Guimarães, R. F. Classificação e eliminação dos ruídos em imagens hiperespectrais pela análise sequencial da transformação por fração de ruído mínima. *Revista Brasileira de Geofísica*, v. 20, n. 1, p. 31-41, 2002.
- Cerqueira, D. B.; Rocha, W. F.; Relação entre tipos de vegetação e fluxo de CO₂ no Bioma Caatinga: Estudo de caso em Rio de Contas – BA. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, XIII, Florianópolis, 2007. *Anais...* São José dos Campos: INPE, 2007. p. 2413-2419.
- Coltri, P. P.; Ramirez, G. M.; Walter, M. K. C.; Zullo Júnior, J.; 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 do cafeeiro arábica. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, XIV, Natal, 2009. *Anais...* São José dos Campos: INPE, 2009. p. 121-128.
- Datt, B.; Mcvicar, T. R.; Van Niel, T. G.; Jupp, D. L. B.; Pearlman, J. S. Preprocessing EO-1 Hyperion Hyperspectral Data to Support the Application of Agricultural Indexes. *Ieee Transactions On Geoscience And Remote Sensing*, v. 41, n. 6, 2003.
- EO-1 User Guide. Version 2.3 - 2003, Supporting materials are available. Disponível em: <<http://eo1.gsfc.nasa.gov>>. Acesso em: 10 set. 2012.
- Fuentes, D. A.; Gamon, J. A.; Cheng, Y.; Claudio, H. C.; Qiu, H.; Mao, Z.; Sims, D. A.; Rahman, A. F.; Oechel, W.; Luo, H. Mapping carbon and water vapor fluxes in a chaparral ecosystem using vegetation indices derived from AVIRIS. *Remote Sensing of Environment*, v. 103, p. 312-323, 2006.
- Galvão, L. S.; Formaggio, A. R.; Tisot, D. A. Discriminação de variedades de cana-de-açúcar com dados hiperespectrais do sensor Hyperion/EO-1. *Revista Brasileira de Cartografia*, v. 57, n. 1, p. 7-14, 2005.

- 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*, v. 112, p. 492-501, 1997.
- 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.
- Jensen, J. R. *Sensoriamento Remoto do Ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres; tradução José Carlos Neves Epiphanyo (coordenador) ... [et al.]*. Parênteses: São Paulo, 2009.
- 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.
- Milone, G. *Estatística: Geral e Aplicada*. São Paulo: Thomson Learning, 2004.
- Nascimento, R. L. Análise comparativa dos componentes do saldo de radiação em áreas de pastagem e floresta na Amazônia. 2012. 78p. *Dissertação (Mestrado)* - Universidade Federal de Campina Grande, 2012.
- Ponzoni, F. J.; Shimabukuro, Y. E. *Sensoriamento Remoto no Estudo da Vegetação*. São José dos Campos, SP: A. Silva Vieira Ed., 2010.
- Rahman, A. F.; Gamon, J. A.; Fuentes, D. A.; Roberts, D. A.; Prentiss, D. Modeling spatially distributed ecosystem flux of boreal forest using hyperspectral indices from AVIRIS imagery. *Journal of Geophysical Research*, v. 106, n. D24, p. 33,579-33,591, 2001.
- 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...* JPL/NASA, Pasadena, California, 2000.
- Rouse, J. W.; Haas, R.H., Schell, J.A.; Deering, D.W., “Monitoring Vegetation Systems in the Great Plains with ERTS”. In: ERTS-1 Symposium. *Proceedings...* NASA, United States, n. 3. p. 309-317, 1973.
- Schramm, V. F.; Vibrans, A. C. Uso de imagens hiperespectrais (EO-1 Hyperion) para detalhamento da detecção das formações florestais na bacia do Itajaí. *Dynamics Revista Tecnológica*, v.13, n.1, p. 59-69, 2007.
- Souza, A. A. Estudo de Fitofisionomias de Cerrado com Dados de Sensor Hyperion/EO-1. 2009. 120p. *Dissertação (Mestrado)* - INPE, São José dos Campos, 2009.
- Wylie, B. K.; Fosnight, E. A.; Gilmanov, T. G; Frank, A. B.; Morgan, J. A.; Haferkamp, M. R.; Meyers, T. P. Adaptive data-driven models for estimating carbon fluxes in the Northern Great Plains. *Remote Sensing of Environment*, v.106, p. 399-413, 2007.

Recebido em Novembro de 2014. Aceito em Abril de 2015.