

Sequestro Florestal de Carbono nas Torres Micrometeorológicas em Diferentes Ambientes na Amazônia Brasileira e sua relação com dados Hyperion

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 evolution of debates about the interaction between the biosphere-atmosphere carbon flux and has placed on the agenda for discussion the possibilities of reconciling hyperspectral remote sensing from estimating biophysical parameters with the concentration and the flow of carbon dioxide (CO₂) in the Brazilian Amazon. Given this situation, it is clear the importance of ecological functions of tropical forests, which are considered terrestrial ecosystems with the greatest biodiversity on the planet. Thus, this research analyzed the concentration and the flux of carbon dioxide from the towers installed flow measurements in forests and transition areas, correlating them with the spectral analysis of vegetation. It is necessary, however, that the steps preceding the processing CO₂ flux should be carefully processed, since the Hyperion has noisier images compared to other hyperspectral sensors. Results indicate that modeling of forest carbon sequestration for the geographic coordinates where they are located five micrometeorological towers in places, can be done from the CO₂ flux index. This index can be associated both with the CO₂ concentration data (ppm) measured at the top of towers, as the data stream (mol.m-2.s-1). Both associations have similarities and are statistically significant with data from Hyperion.

Palavras-chave: Hyperion imaging, carbon sink, Amazon, imagem Hyperion, sequestro de carbono, Amazônia

1. Introdução

O sensoriamento remoto pode fornecer diversas medidas de propriedades da vegetação. Só recentemente têm sido utilizadas as tecnologias colocadas em órbita para estudos em larga escala da dinâmica dos ecossistemas. Apesar de suas limitações, o sensor Hyperion possibilita uma variedade de medidas das propriedades estruturais, bioquímicas e fisiológicas sensíveis a copas das árvores (ASNER et al., 2005). Uma dessas propriedades é o sequestro florestal de carbono definido por meio dos índices de vegetação, entre os quais destaca-se o NDVI que trata a respeito do CO₂ flux.

A aplicabilidade das imagens Hyperion vem avançando gradativamente no Brasil. Muitos autores utilizam as imagens do sensor a fim de verificar o potencial para analisar diversas feições na superfície terrestre, aplicando inúmeras técnicas de processamento.

Baptista (2004) utilizou o índice de CO₂ flux para o mapeamento do sequestro de carbono em ambientes tropicais de Cerrado e ambientes urbanos com dados obtidos com o sensor AVIRIS e Hyperion. Fuentes et al. (2006) usando modelos simples derivados da reflectância espectral, mapearam os padrões de CO₂ flux no ecossistema do semi-árido no sul da Califórnia (Estados Unidos), com sensor AVIRIS, combinando índices de vegetação derivados das imagens de satélite com os fluxos de CO₂ e vapor de água, obtidos para a região em torno da torre. Os autores apresentaram resultados satisfatórios para a alta correlação dos índices PRI e NDVI entre os valores do fluxo modelado.

Cerqueira e Franca-Rocha (2007) analisando a correlação entre o sequestro de carbono com CO₂ flux, no Bioma Caatinga, apontaram a fragilidade no método convencional de quantificação do carbono na vegetação, uma vez que cada vegetação possui características fitossociológicas específicas. Também verificaram que existiam diferenças significativas entre os tipos de vegetação estudados no que tange ao fluxo de CO₂.

Baptista e Munhoz (2009) analisaram por meio de sensoriamento remoto hiperespectral, o comportamento da vegetação pelos índices de CO₂ flux, ICO₂ e conteúdo de umidade da

vegetação, em ambientes localizados o Pantanal de Nhecolândia (MS). Os resultados apontam que os índices utilizados foram satisfatórios para a vegetação terrestre.

Martins e Baptista (2013) analisaram os aspectos multitemporal do desmatamento no Projeto de Assentamento Carão (AC), por meio da análise do sequestro florestal de carbono obtido a partir do índice espectral CO_2 flux. Os resultados mostraram que o mapeamento do sequestro de carbono pela vegetação durante a fase clara da fotossíntese, mostrou-se ser mais eficiente para a avaliação do ritmo temporal de ocupação e de supressão da floresta nativa.

Com objetivo de testar a eficiência do CO_2 flux para detecção do sequestro florestal de carbono, esse estudo apresenta os resultados da modelagem do conteúdo de CO_2 por meio das imagens do sensor Hyperion onde se encontram as cinco torres micrometeorológicas em diferentes ambientes na Amazônia Brasileira.

2. Material e Métodos

2.1 Caracterização da área de estudo

No estudo foram utilizadas cinco torres, denominadas de K34, localizadas no Estado do Amazonas; K83 e K67, no Pará; FNS em Rondônia e SIN no Mato Grosso (Figura 1).

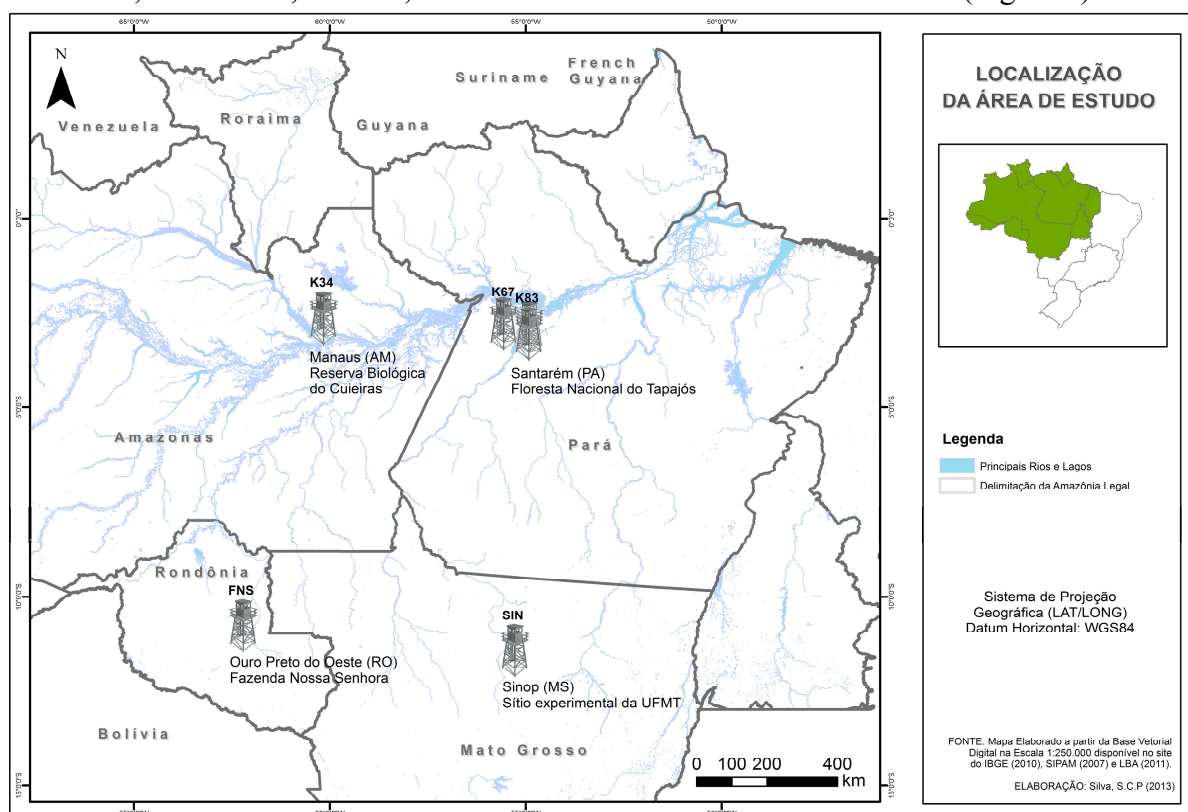


Figura 1. Localização das cinco torres micrometeorológicas na Amazônia Brasileira.

Tipos de Ambientes e Fitofisionomia dos Sítios Experimentais:

Ambientes Naturais

- As torres K34 e K67 estão localizadas em ambiente de floresta primária.
- A torre SIN localiza-se num ambiente de floresta de transição, denominada de Floresta Úmida e Cerrado;

Ambientes Antropizados

- A torre K83 localiza-se dentro de um ambiente de exploração seletiva de madeira, onde predomina-se as Floresta Ombrófila Densa das Terras Baixas;

- A torre FNS localiza-se numa fazenda com imensas áreas de pastagem, com cobertura vegetal predominante de gramíneas.

2.2. Pré-processamento das Imagens Hyperion

Neste estudo foram utilizadas 21 imagens hiperespectrais, 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 atmosférico, o processamento dos dados demanda um cuidado maior (DATT et al., 2003), assim foram realizados primeiramente, a correção atmosférica e a minimização dos ruídos na imagem.

A correção dos efeitos atmosféricos foi realizada utilizando o modelo de transferência radiativa MODTRAN. Para a atenuação dos efeitos atmosféricos nas imagens do Hyperion, utilizou-se 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 para o pré-processamento de 21 imagens hiperespectrais. Os parâmetros do modelo incluíram uma atmosfera tropical com um modelo de aerossol rural, com concentração média de CO_2 na atmosfera de 390ppm, e as altitudes do terreno foi verificada 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, geram 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*).

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 registradas 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. Processamento das Imagens Hyperion

O índice CO_2 flux (RAHMAN et al., 2000) mede a eficiência do processo de sequestro de carbono pela vegetação (RAHMAN et al., 2001; BAPTISTA, 2003). Para sua determinação é utilizado a integração do NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) com o sPRI (*Photosynthetic Reflectance Index* reescalado para valores positivos).

2.4. Aquisição dos Dados Micrometeorológicos

Os dados de campo foram coletados durante todo o ano de 2000 a 2012 e solicitados junto aos escritórios locais do Programa LBA.

Nas torres micrometeorológicas, os fluxos medidos são os de *momentum*, de calor sensível, de calor latente (evapotranspiração) e de gás carbônico. São monitoradas também as variáveis de precipitação, temperatura e umidade do ar, pressão atmosférica, magnitude e direção do vento e radiação solar e terrestre) e as variáveis do solo (temperatura e umidade do solo e o fluxo de calor no solo).

As visitas nas torres micrometeorológicas foram realizadas entre os meses de agosto a outubro de 2013, com o auxílio dos pesquisadores, professores e estudantes e técnicos de Instituições que são vinculados às pesquisas realizadas em cada torre. Foram necessários também máquina fotográfica e GPS (Figura 2).



Figura 2. Torres micrometeorológicas.

Os sítios experimentais das torres de fluxo utilizam o sistema *Eddy Covariance* para medir as trocas de CO₂, vapor de água e energia entre os ecossistemas terrestres e a atmosfera.

Os dados medidos e aferidos podem ser acessados quando disponíveis na Rede FLUXNET (fluxnet.ornl.gov). Os dados de CO₂ são mantidos na frequência de 30 minutos para permitir o processamento de dados padronizado, preenchimento de lacunas e formatos por vários pesquisadores (Tabela 1).

Tabela 1. Variáveis do Sistema Edd (*Eddy Correlation System*), nas torres em estudo.

Var. Medidas	Torres	Sensor	Unidades
Fluxo de CO ₂	K34	LI-6262/LI-7000/LI-7500, LI-COR	μmol/m ² /s
	K83	Li-Cor LI7000/LI7500	μmol/m ² /s
	K67	Anemômetro ultrassônico (CSAT-3, <i>Campbell Scientific</i>)	μmol/m ² /s
	JAR	Anemômetro sônico tridimensional (Solent 1012R2)	μmol/m ² /s
Concentração de CO ₂	K34	LI-820/li-840, LI-COR	ppm
	K83	LI-COR LI7000	ppm
	K67	LI-6262, Licor	ppm
	FNS	LI-7500 (LI-COR Inc.)	ppm
	JAR	LI-7500, LICOR	ppm
	SIN	Modelo LI-820, LI-COR	ppm

3. Resultados e Discussão

Compreender o comportamento do CO₂ nos diferentes ambientes, seja em, florestas tropicais ou em áreas de intervenção antrópica é essencial para deduzir como essa dinâmica pode estar correlacionada às análises espectrais da vegetação do sensor Hyperion para detecção do sequestro florestal de carbono e do conteúdo de CO₂ atmosférico, que são objetos principais desse estudo. Nessa análise foram utilizados os dados obtidos a partir de informações aferidas das torres micrometeorológicas junto aos escritórios do LBA e do banco de dados disponíveis na rede Fluxnet, de medição direta de concentração (ppm) e fluxo ($\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$) de CO₂ na Amazônia brasileira.

A figura 3 demonstra que entre os anos de 2001 a 2005, os valores das concentrações média de CO₂ foram cíclicos, em todos os pontos amostrados nas florestas primárias (K34, K67 e SIN), floresta primária com atividade de exploração seletiva de madeira (K83) e área de pastagem (FNS). Os períodos diurno e noturno possuem características bastante diferenciadas quanto ao comportamento do CO₂. Assim, durante a noite, a concentração de CO₂ na atmosfera é alta, sendo que ao longo do dia, a concentração de dióxido de carbono é baixa. O que permitiu detectar que a vegetação está sequestrando o CO₂ atmosférico, tanto nos pontos amostrados nas florestas primárias, e florestas com atividade de exploração seletiva de madeira quanto na área de pastagem. A variação da concentração de CO₂ nas amostras da florestas primárias oscilou em torno de 402 ppm (com valores mínimos de 353 ppm e máximos de 462 ppm). As medições realizadas na floresta primária com atividade de exploração seletiva de madeira indicaram a concentração média de CO₂ de 442 ppm variando entre 400 ppm e 481 ppm. Quanto à variação da concentração de CO₂ na área de pastagem, em média ficou em torno de 421 ppm com valores variando entre 387 a 483ppm.

De um modo geral, as concentrações nos pontos amostrados parecem estar relacionadas com estudos que demonstraram a importância das florestas tropicais como sumidouros e emissores de CO₂. Esse é o padrão esperado e observado por outros autores. As medições realizadas por Santos (1999), utilizando dados de uma torre micrometeorológica indicam que a floresta tropical atua como sumidouro de CO₂ durante o dia. Este autor detectou que as concentrações de CO₂ são elevadas no período noturno, em torno de 450 ppm, indicando que a floresta é uma emissora de CO₂. Segundo medições de Leal (2000), o CO₂ possui um comportamento com variação cíclica. Nota-se que ocorre uma maior concentração de CO₂ no período noturno e uma diminuição ao longo do dia. Silva Junior (2003) indicou haver uma relação análoga entre a concentração de CO₂ tanto nas florestais tropicais quanto na pastagem. Embora, a variação da concentração de CO₂ oscilou com máxima de 532,6 ppm na madrugada, e mínima de 367,4 ppm no período da tarde, em torno das 15:00 horas.

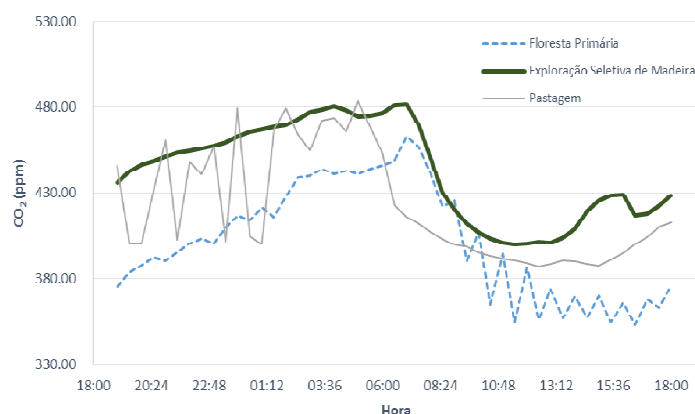


Figura 3. Ciclo diário da concentração média de CO₂ em diferentes ambientes naturais e antropogênicos na Amazônia brasileira.

Na figura 4, observa-se a tendência do comportamento do fluxo de CO₂ nos pontos amostrados nas florestas primárias, floresta primária com atividade de exploração seletiva de madeira e área de pastagem. Com base nas medidas feitas no ciclo de 24 horas, este estudo mostra que no período diurno, o fluxo de CO₂ tende a ser predominantemente negativo, significando que tanto floresta quanto pastagem assimilam CO₂ da atmosfera. Assim, à noite, o fluxo de CO₂ inverte-se, tornando-se positivo e indicando que os mesmos ambientes emitem CO₂ para a atmosfera.

O comportamento típico da concentração de CO₂ foi estudado por Aguiar (2005), no qual foi observado que o fluxo positivo do CO₂ é maior à noite, quando as emissões do solo e a respiração combinam-se como uma fonte de emissão de CO₂ para atmosfera, enquanto que no período diurno, o CO₂ atmosférico é absorvido pela vegetação e as reações fotoquímicas começam a ocorrer de maneira mais intensa. Segundo Santos (1999), as concentrações de CO₂ são sempre maiores à noite, enquanto o fluxo de CO₂ (na maioria das vezes) é maior durante o dia, quando as concentrações de CO₂ estão vinculadas aos processos fotossintéticos, enquanto que os fluxos de CO₂ possuem relação com o movimento do ar e a turbulência. Análises feitas por Silva Junior (2003) indicam que o comportamento do fluxo de CO₂ nas florestas tropicais é análoga a pastagem. Portanto, a análise da concentração e fluxo de CO₂ mostram uma dinâmica cíclica no comportamento de CO₂. Assim, o comportamento do CO₂ é similar tanto em florestas primárias e florestas com atividade de exploração seletiva de madeira quanto em pastagem. Por essa razão, este estudo mostra fornece subsídios para determinar a melhor abordagem para validar as modelagens espectrais, quando utilizada na verificação de sequestro florestal de carbono, por meio processamento digital de imagens hiperespectrais.

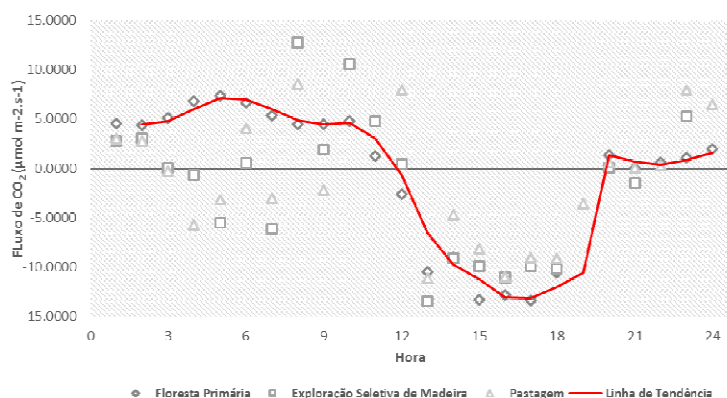


Figura 4. Ciclo diário do fluxo médio de CO₂ em diferentes ambientes naturais e antropogênicos na Amazônia brasileira.

A análise de regressão das variáveis verificadas a partir do coeficiente de determinação ajustou o CO₂flux a uma função não-linear com distribuição polinomial. De acordo com os resultados pode-se verificar que o CO₂flux se relacionam melhor com a concentração de CO₂ no topo da torre, onde é verificada os melhores ajustamentos da curva com os coeficientes de determinação de R²=0,62. O ajuste entre o CO₂flux e os dados de fluxos (mol.m⁻².s⁻¹) apresentou ajustamentos melhores de (R²=0,8673) (Figura 5).

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 da torre são mais eficientes para a associação com medidas espectrais, do que as medições de CO₂ realizadas ao longo da torre. O modelo ajustado indica que 62% da variação observada de CO₂flux são explicados pela quantidade de CO₂ absorvido pela vegetação no momento da passagem do sensor Hyperion. Entretanto, a modelagem de sequestro florestal de carbono tem melhores ajustes com a associação dos dados de fluxo (mol.m⁻².s⁻¹), indicando que a variação de 86%

de CO₂flux são explicados pela intensidade de assimilação e emissão de CO₂ atmosférico, no momento da passagem do sensor, onde se encontravam as cinco torres micrometeorológicas.

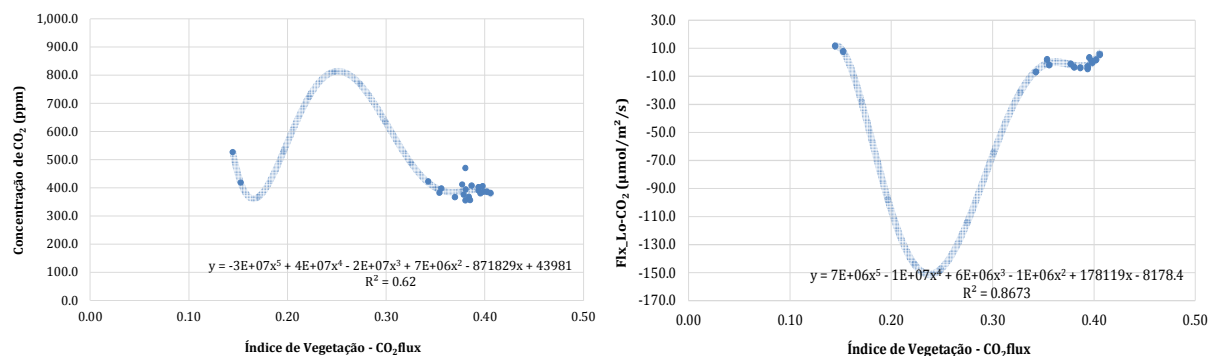


Figura 5. Modelagem de sequestro florestal de carbono com dados de concentração de CO₂ (ppm) e fluxo (mol.m⁻².s⁻¹).

Pela matriz de correlação de Pearson pode-se inferir que o CO₂flux apresentou uma forte correlação ($r=0,641$) com a concentração de CO₂ (ppm) medidos no topo da torre e ($r= 0,663$) com as medidas de fluxo de CO₂ (mol.m⁻².s⁻¹). A verificação dos valores encontrados entre as variáveis CO₂flux e CO₂ medido no topo da torre e CO₂flux e fluxo de CO₂, se casuais ou se existiam a evidência de correlação pelo coeficiente de Pearson foram testadas pelas hipóteses utilizando a distribuição de Student t, com $n - 2$ graus de liberdade. O teste indicou que a correlação é estatisticamente significativa para $\alpha=0,05$, para ambas correlações.

Dentre as técnicas não paramétricas utilizou-se o *Teste U de Wilcoxon-Mann-Whitney* para verificar a similaridade entre as variáveis. O teste *U* indicou 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 micrometeorológicas. Portanto, existe similaridade entre as variáveis analisadas.

Resultados similares de CO₂flux foram encontrados por Rahman et al. (2000; 2001), entretanto os autores apresentam uma relação linear, com um valor de R^2 de 0,78, entre os dados de CO₂flux e o fluxo de CO₂ nas torres utilizando o sensor AVIRIS. Resultados foram satisfatórios para o mapeamento de fluxos fotossintéticos numa paisagem de floresta boreal, salientando que o AVIRIS tem uma excelente relação sinal/ruído, coisa que não se vê nos dados Hyperion. Fuentes et al. (2006) apresentaram resultados uma alta correlação ($R^2=0,96$) entre os índices PRI e NDVI, usando o sensor AVIRIS e os valores do fluxo da torre num ecossistema de semi-árido 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 estar pertinente a pelo menos 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%.

4. Conclusões

A modelagem do sequestro florestal de carbono a partir da aplicação do CO₂flux, com imagens Hyperion mostrou-se eficiente para as áreas naturais e antrópicas da Amazônia Brasileira. E as medidas de CO₂ (ppm) no topo da torre são mais ajustadas ao modelo, do que as medições de CO₂ coletadas ao longo da torre. Entretanto, os melhores ajustes para o CO₂flux foram apresentados com a associação dos dados de fluxo (mol.m⁻².s⁻¹).

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.

Agradecimentos

À FAPEAM pela bolsa de doutorado da primeira autora. Ao Instituto de Geociências – UnB, pela utilização para processamento e análises espectrais das imagens de satélite e ao INPA pela parceria junto ao Programa LBA.

Referências Bibliográficas

- AGUIAR, R., G. **Fluxos de massa e energia em uma floresta tropical no sudoeste da Amazônia**. 2005. 78 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Mato Grosso, Instituto de Ciências Exatas e da Terra, Cuiabá, 2005.
- 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. Mapeamento do sequestro de carbono e de domos urbanos de CO₂ em ambientes tropicais, por meio de sensoriamento remoto hiperespectrais. **Geografia, Rio Claro**, v. 29, n. 2, p. 189-202, 2004.
- BAPTISTA, G. M. M. Mapeamento do sequestro de carbono e de domos urbanos de CO₂ em ambientes tropicais, por meio de sensoriamento remoto hiperespectrais. **Geografia, Rio Claro**, v. 29, n. 2, p. 189-202, 2004.
- 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.
- BAPTISTA, G. M. M., MUNHOZ, C. B. R. Comportamento do sequestro florestal de carbono, do conteúdo de CO₂ atmosférico e do conteúdo de umidade da vegetação no Pantanal de Nhecolândia, MS, por meio de sensoriamento remoto hiperespectral. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, XIV, Natal, 2009. **Anais...**, São José dos Campos: INPE, 2009. p. 1071-1078.
- 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.
- 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**, vol. 41, no 6, 2003.
- 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.
- LEAL, L. S. M. **Variação sazonal do fluxo e da concentração de CO₂ na região leste da floresta amazônica – PA**. 2000. 56p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Minas Gerais, 2000.
- MARTINS, L.N.; BAPTISTA, G.M.M. Análise multitemporal do sequestro florestal de carbono no projeto de assentamento Carão, Acre. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 06, n. 06, p. 1648-1657, 2013.
- 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**, vol. 106, no. D24, pages 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. **Anais...** JPL/NASA, Pasadena, Califórnia, 2000.
- SANTOS, E. O. **Contribuição ao estudo do fluxo de dióxido de carbono dentro da floresta amazônica**. 1999. 87p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro-RJ, 1999.
- SILVA JÚNIOR, R. S. **Concentrações e Fluxos de Dióxido de Carbono (CO₂) Sobre Pastagens na Região Amazônica**. 2003. 93p. Dissertação (Meteorologia) – Universidade Federal de Alagoas. Centro de Ciências Exatas e Naturais, Maceió, 2003.