

MAPEAMENTO DO SEQÜESTRO DE CARBONO E DE DOMOS URBANOS DE CO₂ EM AMBIENTES TROPICAIS, POR MEIO DE SENSORIAMENTO REMOTO HIPERESPECTRAL

Gustavo Macedo de Mello BAPTISTA¹

Resumo

O objetivo desse artigo é apresentar o mapeamento do fluxo de CO₂ utilizando o modelo proposto por Rahman *et al.* (2000) para o ambiente tropical de Cerrado. Para tal, foram utilizadas duas cenas AVIRIS e uma do Hyperion. Além disso, foi desenvolvido um novo índice espectral, o ICO₂, para mapear o teor de dióxido de carbono na coluna de ar atmosférico. Os resultados apresentaram alta correlação e descreveram, em todos os casos, funções negativas. Um outro aspecto considerado nesse artigo foi a possibilidade de mapear o fenômeno domo urbano de CO₂.

Palavras-chave: índice espectral; fluxo de CO₂; AVIRIS, Hyperion e domo urbano de CO₂

Abstract

Carbon sink and urban CO₂ dome mapping in tropical environment, by means of hyperspectral remote sensing

The aim of this paper is present the CO₂ flux mapping using model proposed by Rahman *et al.* (2000) to Cerrado tropical environment. It was used two AVIRIS scenes and one Hyperion scene. Besides it was developed a new spectral index, ICO₂, for mapping the carbon dioxide contents in atmosphere, using the 2.0 mm spectral feature, and correlated with the CO₂ flux model. The results describe, in all cases, a negative function and present a high correlation coefficient. Another aspect presented in this paper is a new methodology to map urban CO₂ dome phenomenon using hyperspectral data and the ICO₂.

Keywords: spectral index; CO₂ flux; AVIRIS, Hyperion; urban CO₂ dome.

¹Geógrafo, Professor Adjunto do Programa de Pós-Graduação *Stricto Sensu* em Planejamento e Gestão Ambiental e do Curso de Engenharia Ambiental da Universidade Católica de Brasília. E-mail: gmbaptista@pos.ucb.br

INTRODUÇÃO

O efeito estufa é entendido como um processo de manutenção da amplitude térmica global, por meio de bloqueio, ocasionado por gases, da radiação de ondas longas emitida pela superfície terrestre. Graças a esse processo a temperatura média do planeta mantém-se em torno de 16°C e na sua ausência essa média cairia cerca de 32°C, atingindo os 18°C negativos.

Esses gases exercem, portanto, importantes trocas energéticas atmosféricas, sendo o vapor d'água o mais importante agente de efeito estufa. Outros gases de importância radiativa são o dióxido de carbono (CO₂), o ozônio (O₃), o metano (CH₄) e o óxido nitroso (NO₂). Dentre esses chamados gases de efeito estufa - GEE, o dióxido de carbono deve ser encarado como um dos principais responsáveis pelo processo.

O CO₂ tem sua importância não só associada ao efeito estufa, mas ao processo de fotossíntese e sua concentração tem aumentado progressivamente nos últimos anos.

Estudos recentes salientam a possibilidade da utilização do índice espectral NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) para estimar o seqüestro de carbono pela vegetação durante a fase clara da fotossíntese. Rahman *et al.* (2000) afirmam ser possível a determinação deste fluxo de CO₂ por meio da integração do NDVI com outro índice espectral, o PRI (*Photosynthetic Reflectance Index*) (GAMON *et al.*, 1997) e sua comparação entre os resultados obtidos por meio da modelagem com os dados AVIRIS e os medidos no campo para formação boreal de coníferas, apresentou um elevado coeficiente de determinação de 0,78. Essa integração, aqui chamada de CO₂flux, mede a eficiência do processo de seqüestro de carbono.

O presente trabalho visa validar a integração proposta por Rahman *et al.* (2000) para duas cenas AVIRIS da missão SCAR-B, de 1995, e uma cena Hyperion com diferentes extratos de vegetação dos Cerrados. Como não houve a possibilidade de determinação do fluxo de CO₂ no campo, no momento da obtenção das imagens, o teste baseou-se na correlação com a intensidade da feição espectral do CO₂ nos espectros de radiância centrada a 2,0 µm, aproximadamente, aqui chamada de ICO₂.

ESPECTROSCOPIA DE IMAGEAMENTO: AVIRIS (AIRBORNE VISIBLE/ INFRARED IMAGING SPECTROMETER) E HYPERION

Green *et al.* (1998) definiram espectroscopia de imageamento como a aquisição de imagens na qual, para cada pixel, existe um espectro medido da energia eletromagnética que chega ao sensor. Como todo pixel desse tipo de imagem apresenta um valor de radiância ou reflectância para cada uma das mais de 200 bandas, é possível obter um espectro contínuo. Esses espectros são usados para derivar informações baseadas na assinatura espectral dos alvos, que é entendida como a interação entre a matéria e a energia.

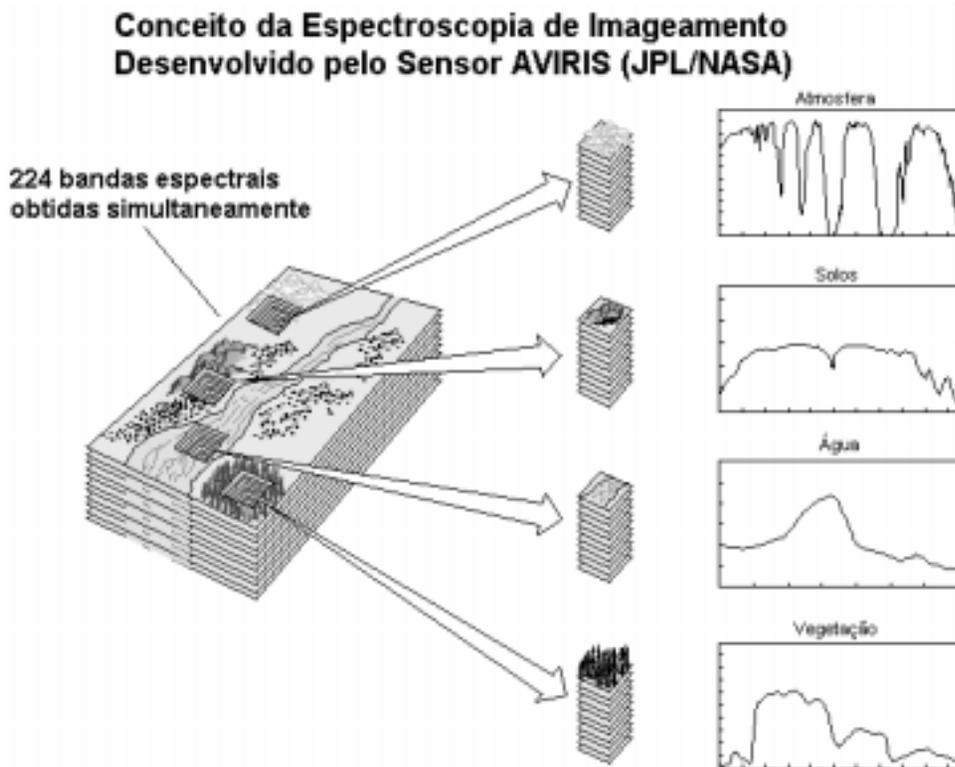
O conceito da espectroscopia de imageamento é mais bem ilustrado na figura 1, adaptada de Green *et al.* (1998).

Goetz (1992) conceituou a espectroscopia de imageamento como a aquisição simultânea de imagens num número grande de bandas espectrais contíguas e concluiu que, para analisar esses dados, são necessárias ferramentas poderosas de análise espectral. Enfatizou ainda que a quantidade de informação existente é bastante

grande, o que pressupõe processamentos pesados, mas que permitem a obtenção de uma ampla gama de dados.

O AVIRIS, acrônimo de espectrômetro de imageamento visível e infravermelho aerotransportado, é um sistema sensor acoplado numa plataforma aerotransportada, composto por 224 bandas que recobrem o espectro refletido com 12 bits de resolução radiométrica e 20 metros de resolução espacial. Já o Hyperion é um sensor instalado no satélite EO1, que recobrendo a mesma faixa do espectro com 220 bandas de 16 bits, possui 30 metros de resolução espacial. Ambos apresentam 10 nm amplitude de bandas.

Figura 1 - Conceito de espectroscopia de imageamento. Para cada alvo componente do terreno, são obtidos espectros (modificado de Green et al., 1998)



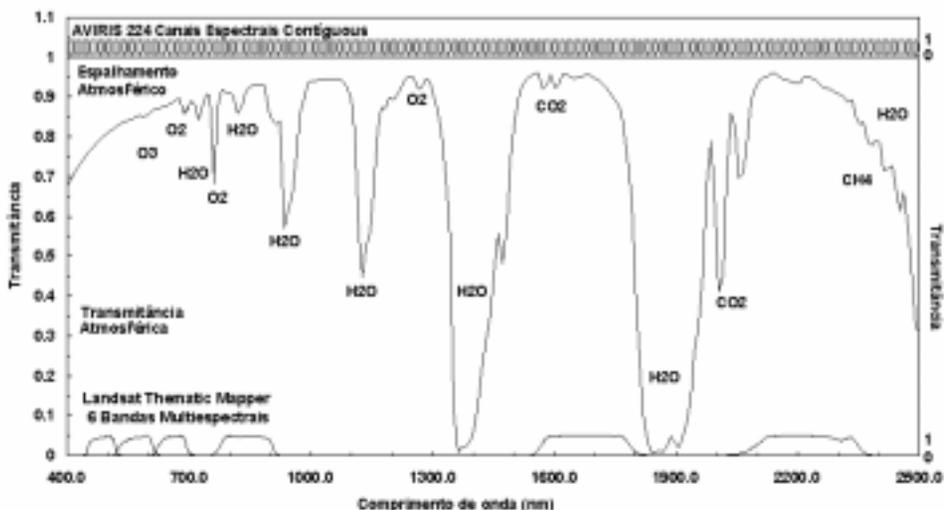
ABSORÇÃO DE GASES NA ATMOSFERA

Segundo Slater (1980), a absorção é uma transformação irreversível da energia radiante em calor. A absorção atmosférica resulta em uma perda efetiva de ener-

gia para os constituintes atmosféricos. Da faixa do visível até 0,8 μm , a absorção da atmosfera limpa é praticamente inexistente, porém, numa atmosfera turva ou mesmo poluída, as absorções passam a ser considerável. A absorção decorrente do ozônio é bastante forte em 0,29 μm e o vapor d'água e o dióxido de carbono geram feições de absorção na faixa do infravermelho (SLATER, 1980).

Segundo Gao et al. (1993), existem aproximadamente trinta gases na atmosfera terrestre, mas a maioria não produz feições de absorção observáveis na faixa do espectro de 0,4 a 2,5 μm , recoberta pelo sensor AVIRIS. Somente sete gases, o vapor d'água (H₂O), o dióxido de carbono (CO₂), o ozônio (O₃), o óxido nitroso (N₂O), o monóxido de carbono (CO), o metano (CH₄) e o oxigênio (O₂), produzem feições perceptíveis nessa faixa do espectro, que influenciam muito mais dados hiperespectrais do que dados multiespectrais, como pode ser observado nos espectros de transmitância apresentados na figura 2.

Figura 2 - Comparação dos espectros de transmitância dos gases com as bandas dos sensores AVIRIS e TM5. Adaptado de Green (2001)



Conforme se pode notar na figura 2, o vapor d'água apresenta várias feições intensas, e duas delas apresentam 100% de absorção; o dióxido de carbono apresenta feições intensas próximas a 2,0 μm ; o ozônio apresenta uma feição próxima a 0,6 μm , com um pico de absorção de aproximadamente 10%; o óxido nitroso e o monóxido de carbono apresentam feições pouco intensas entre 2,0 e 2,5 μm com picos de absorção variando entre 1 a 2% de intensidade; o metano gera uma feição em torno de 2,35 μm com intensidade de absorção de 20%; o oxigênio apresenta várias bandas na faixa que vai de 0,6 a 1,3 μm (GAO et al., 1993).

As faixas do espectro que apresentam menor absorção dos gases da atmosfera são chamadas de janelas atmosféricas. Várias janelas existem na faixa coberta pelo AVIRIS e pelo Hyperion, ou seja, de 0,4 a 2,5 μm , como por exemplo, as faixas em torno de 0,85, 1,05 e 1,25 μm (GAO et al., 1993).

Green (2001) identifica as feições espectrais do CO₂, nos dados AVIRIS de radiância, na faixa recoberta pelo sensor de 0,4 e 2,5 μm, sendo a centrada a 2,0 μm a mais significativa e mais notada na figura 2.

ÍNDICES ESPECTRAIS PARA O SEQÜESTRO DE CARBONO PELA VEGETAÇÃO E PARA OS TEORES DE CO₂ ATMOSFÉRICO

Segundo Rahman et al. (2000) o seqüestro de carbono pela vegetação depende da integração do NDVI e do PRI, dois índices espectrais do tipo “diferença normalizada”. O índice NDVI expressa a diferença de reflectância entre a feição de absorção do vermelho (660 nm) e o aumento de albedo que ocorre nos espectros de vegetação após o início do infravermelho próximo (800 nm). Já o PRI expressa a diferença existente entre a feição de absorção no azul (531 nm) e o pico de reflectância do verde (570 nm).

Diversos estudos recentes mostram que o índice espectral PRI pode ser correlacionado com as taxas de fotossíntese e, como citado anteriormente, o NDVI com o seqüestro de carbono. Isso é facilmente compreendido, pois quanto maior for a atividade fotossintética, maior serão as feições de absorção nas faixas do azul e do vermelho e mais expressivos serão os valores.

A figura 3 apresenta um exercício que visa mostrar essas relações de absorções e o vigor da vegetação. Para tal, utilizou-se dois espectros da biblioteca espectral do USGS (CLARK et al., 1993), sendo o primeiro chamado Lawn Grass GDS91, representando o espectro da vegetação sadia e verde e o segundo, intitulado Dry Long Grass AV87-2, como amostra de vegetação seca. Os dois espectros são de gramíneas. Por meio de modelagem espectral, criaram-se mais três espectros representando a participação de 75% de verde e 25% de seco, de 50% de cada espectro e 25% de verde e 75% de seco.

Pode-se perceber que à medida que a vegetação vai secando as feições de absorção do azul e do vermelho desaparecem, o que pode ser verificado por meio dos índices espectrais NDVI e PRI (Figura 4).

Os índices espectrais NDVI e PRI são expressos de acordo com as equações 1 e 2, respectivamente.

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

e

$$PRI = \frac{R_{531} - R_{570}}{R_{531} + R_{570}} \quad (2)$$

onde R_i é o valor de reflectância em cada comprimento de onda, em nm, de valor i.

Figura 3 - Modelagem espectral utilizando-se espectros da biblioteca espectral do USGS, mostrando a mudança do comportamento da vegetação quando do processo de secagem

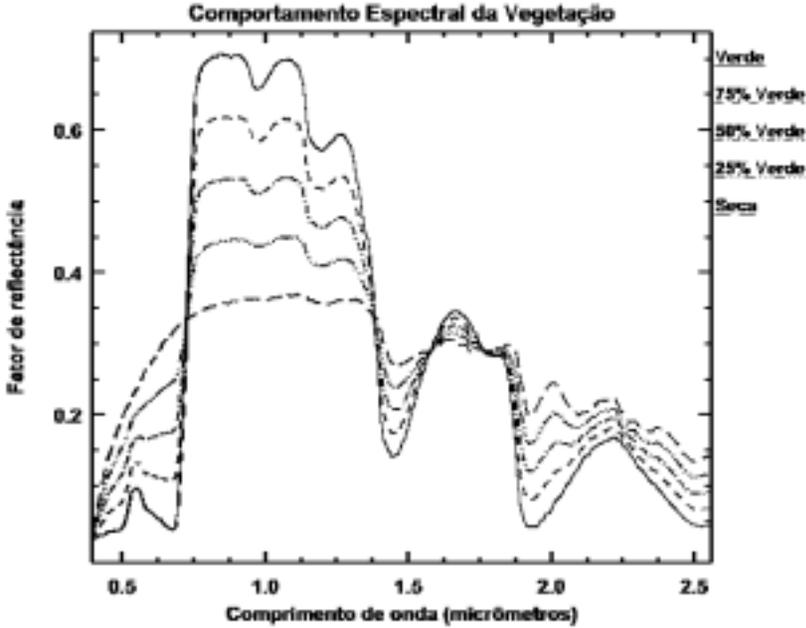
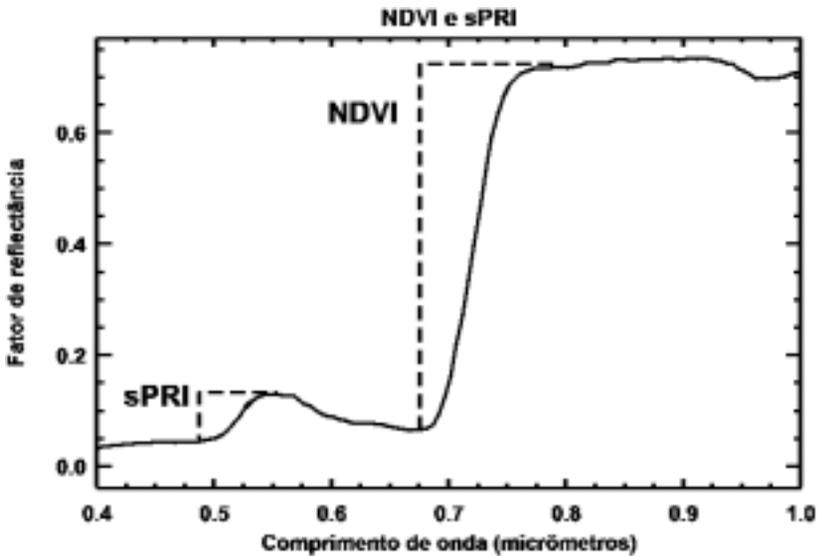
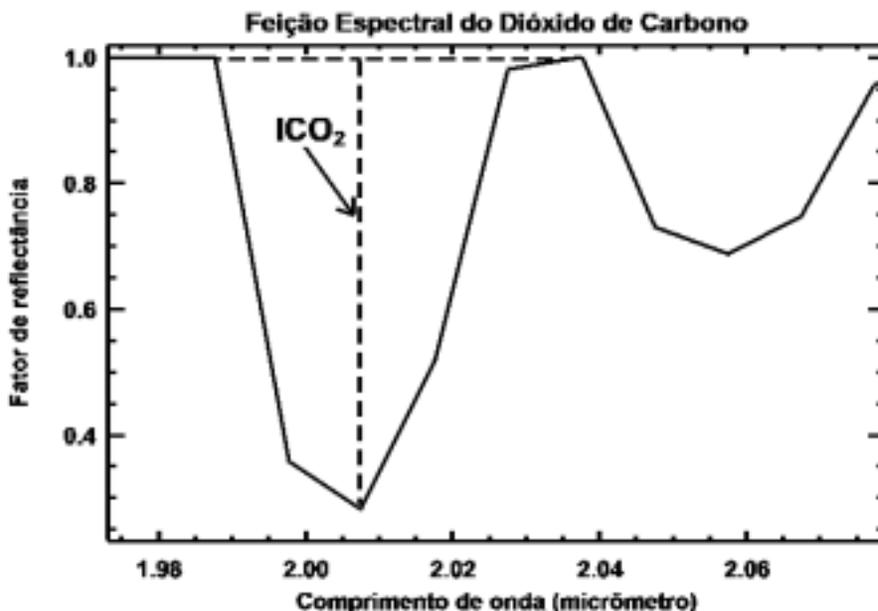


Figura 4 - Índices espectrais NDVI e sPRI



Para a determinação do conteúdo de CO_2 no ar atmosférico determinou-se um índice espectral, chamado de ICO_2 , determinando a intensidade da feição de absorção do gás centrada em $2,0 \mu\text{m}$, por meio da subtração do ponto de máxima, do de mínima radiância, localizados a $2,037$ e a $2,007 \mu\text{m}$, respectivamente. A visualização de ICO_2 é possível na figura 5.

Figura 5 - Intensidade da feição espectral do CO_2 atmosférico obtido numa cena AVIRIS, chamado de ICO_2



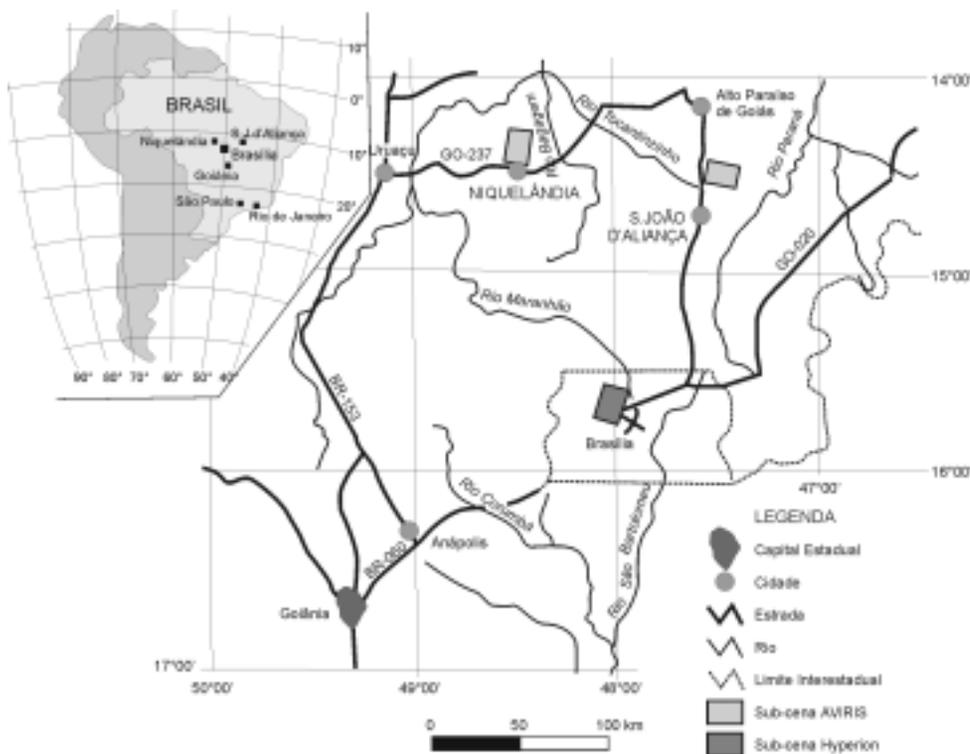
METODOLOGIA

Para realização do presente estudo foram adotadas sete etapas: seleção das cenas AVIRIS e Hyperion; determinação do NDVI; determinação de PRI; reescalonamento de PRI, gerando sPRI; determinação de $\text{CO}_{2\text{flux}}$; determinação de ICO_2 ; e regressão linear entre $\text{CO}_{2\text{flux}}$ e ICO_2 .

Para a seleção das cenas AVIRIS e Hyperion, buscaram-se cenas que contivessem diversidade de estratos vegetais. Do sensor AVIRIS adotou-se uma cena do município de São João D'Aliança, uma do município de Niquelândia, ambas no estado de Goiás, e do Hyperion, uma dentro do Distrito Federal, conforme pode ser visto no mapa de localização das áreas (Figura 6).

Os dados AVIRIS foram obtidos no mesmo dia com diferença de menos de $\frac{1}{2}$ hora entre as aquisições, pois o voo de Niquelândia foi precedido do de São João D'Aliança. Já a cena Hyperion foi obtida em no início de 2001 para o projeto de pesqui-

Figura 6 - Mapa de localização das áreas de estudo



sa encabeçado pelo Professor Alfredo Huete, da Universidade do Arizona em Tucson, que gentilmente cedeu os dados para este trabalho. O segmento da cena selecionado apresenta o Parque Nacional de Brasília e parte de seu entorno imediato, além das cidades satélites de Ceilândia, Taguatinga, Samambaia e Recanto das Emas.

Depois de selecionadas as cenas, o passo seguinte foi a determinação do índice de vegetação por diferença normalizada ou NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*), por meio da equação 1. Esse índice espectral visa mapear a relação existente entre a absorção de radiação para a fotossíntese na faixa espectral do vermelho (660 nm) e o pico de reflectância que a vegetação apresenta na faixa do infravermelho próximo (800 nm). Esse procedimento foi realizado por meio do módulo *transform*, opção NDVI, do ENVI®, versão 3.2.

O mesmo módulo foi utilizado para a determinação do índice fotossintético de reflectância ou PRI (*Photosynthetic Reflectance Index*), determinado pela equação 2. Também obtido pela diferença normalizada, o PRI mede a relação existente entre o pico de reflectância da vegetação na região do verde e a absorção de radiação na faixa do azul. Diferente do NDVI na seqüência das bandas, o PRI, segundo Rahman et al. (2000), necessita de um reescalamento de seus valores evitando-se assim os dados negativos. Esse procedimento é obtido por meio do módulo *Band Math* do ENVI®, adicionando-se uma unidade e dividindo o resultado por 2, gerando o plano

de informação sPRI ou PRI reescalonado. A determinação do índice CO_2flux é feita pela multiplicação, no módulo *Band Math*, dos planos de informação NDVI e sPRI.

Após esse procedimento, adotou-se, como forma de validação do método para ambientes tropicais, a determinação do conteúdo de CO_2 na coluna de ar adjacente aos diversos alvos componentes da cena. Para tal, determinou-se o índice espectral ICO_2 que se baseia na intensidade da feição de absorção do dióxido de carbono, centrada à 2,0 μm . O procedimento é feito a partir da diferença entre o ponto de mínima reflectância, ou o vértice da feição, e suas bordas normalizadas por remoção do contínuo espectral (BAPTISTA, 2001).

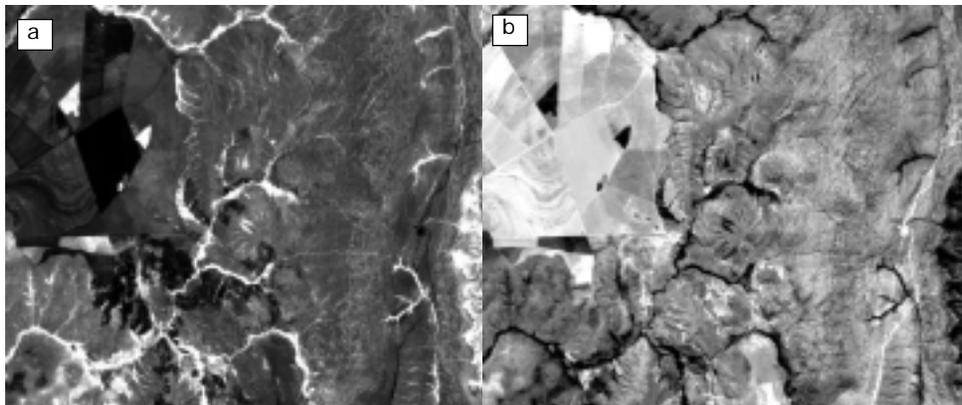
Como o resultado é uma imagem que representa o conteúdo de CO_2 atmosférico na coluna de ar adjacente aos alvos da cena, adotou-se um transector, por meio do módulo *Profiles*, do ENVI®, como forma de estimar, para os dados Hyperion, os domos urbanos de CO_2 , pois essa cena, como já mencionado, apresenta o contato de unidade de conservação com adensamentos urbanos. Para a visualização tridimensional dos domos urbanos de CO_2 , adotou-se o plano de informação ICO_2 como MDE (Modelo Digital de Elevação), superpondo uma imagem pancromática. Isso foi feito no módulo *3D SurfaceView*, do ENVI®.

Finalmente, a etapa de regressão linear entre CO_{2flux} e ICO_2 foi realizada, por meio do módulo *Regress* do software IDRISI 32®, que realiza esse procedimento estatístico com dados de 8 bits.

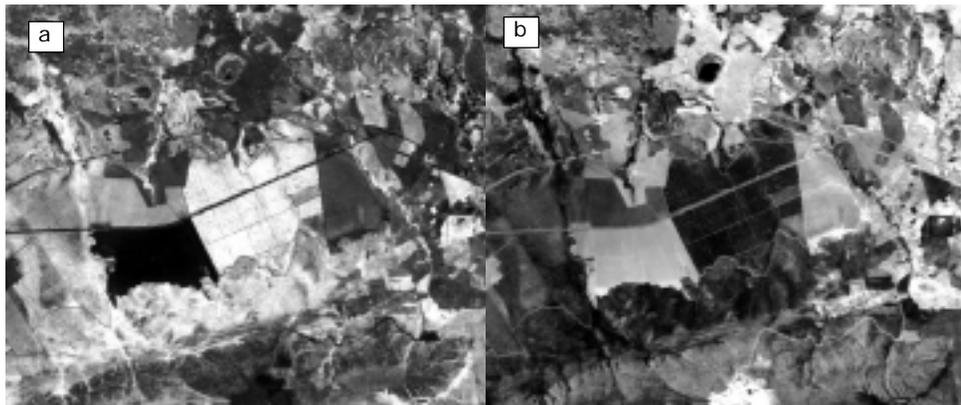
RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os dados foram processados no software ENVI®, versão 3.2, utilizando-se o módulo *band math* e as regressões lineares foram obtidas por meio do software IDRISI 32®. As figuras 7, 8 e 9 apresentam o resultado da integração entre NDVI e sPRI, chamada de CO_2flux e da determinação do conteúdo de CO_2 atmosférico, chamada de ICO_2 para todas as três cenas.

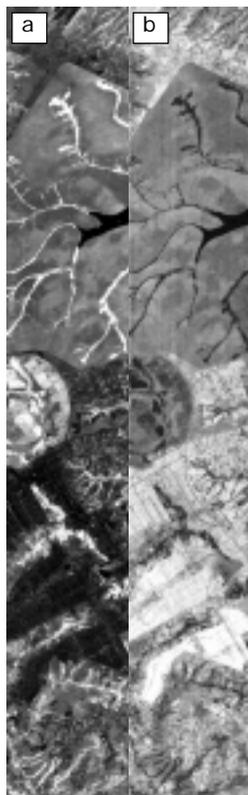
Figura 7 - CO_2flux (a) e ICO_2 (b) para a cena AVIRIS de São João D'Aliação



**Figura 8 - CO₂ flux (a) e ICO₂ (b) para a cena AVIRIS
de Niquelândia**



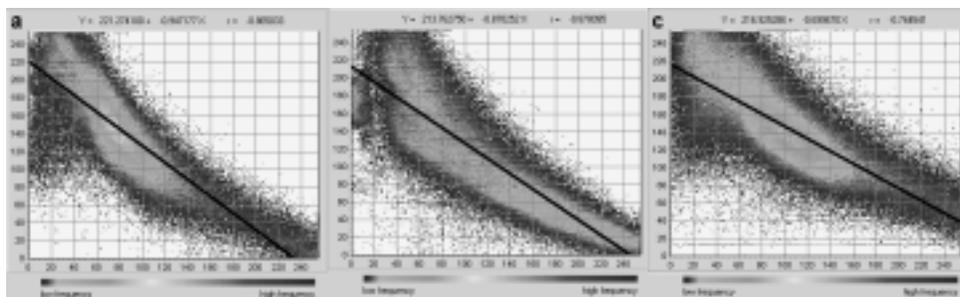
**Figura 9 - CO₂ flux (a) e ICO₂ (b) para a cena
Hyperion de Brasília**



Pode-se notar que a imagem CO_2flux é o oposto da imagem ICO_2 . Esse resultado era previsto, pois áreas com maior densidade florestal, tais como matas ciliares, apresentam valores elevados de eficiência de seqüestro de carbono e baixos teores de CO_2 atmosférico. Já as áreas urbanas, como na cena Hyperion, e as de solos expostos, nas cenas AVIRIS, apresentam comportamento inverso.

Esses parâmetros são inversamente proporcionais, pois quanto maior o seqüestro, menos CO_2 atmosférico existirá na coluna sobre o alvo. Esse fato foi comprovado por meio da regressão linear entre os resultados que descreve funções negativas e altos coeficientes de correlação (0,86 e 0,87 para os dados AVIRIS e 0,74 para os do Hyperion, sendo isso explicado, pois os dados AVIRIS são aerotransportados e obtidos à 20 km de altitude. Já os do Hyperion são orbitais, reduzindo o coeficiente de correlação) (Figura 10).

Figura 10 - Regressões lineares entre CO_2flux e ICO_2 para São João D'Aliança (a), Niquelândia (b), e Brasília (c), respectivamente



Como a cena do Hyperion apresenta um contato entre uma unidade de conservação, o Parque Nacional de Brasília (PARNA Brasília), e áreas urbanas, buscou-se à identificação de um fenômeno recorrente em cidades: os domos urbanos de CO_2 . Esses domos representam a alta concentração de CO_2 atmosférico nas colunas de ar, adjacentes aos alvos urbanos.

Para tal, utilizou-se a imagem ICO_2 adotando-se um transector, no sentido norte-sul. Esse transector apresentou dois níveis facilmente identificáveis, sendo o patamar inferior correspondente ao Parque Nacional e o superior, às áreas urbanas (Figura 11).

Para uma melhor compreensão do domo adotou-se o procedimento de visualização tridimensional dos dados, colocando a imagem ICO_2 como modelo digital de elevação (MDE) e uma cena sobreposta. Posteriormente, rotacionou-se o MDE para uma visualização dos dois contextos: o PARNA Brasília e os domos urbanos de CO_2 visualizáveis na figura 12.

Conforme se pode notar as áreas urbanas apresentam-se, tanto no transector como na visualização tridimensional, como redomas de dióxido de carbono, enquanto que o conteúdo de CO_2 cai bastante quando da presença de vegetação fotossinteticamente ativa.

Figura 11 - Transeção identificando os domos urbanos CO₂

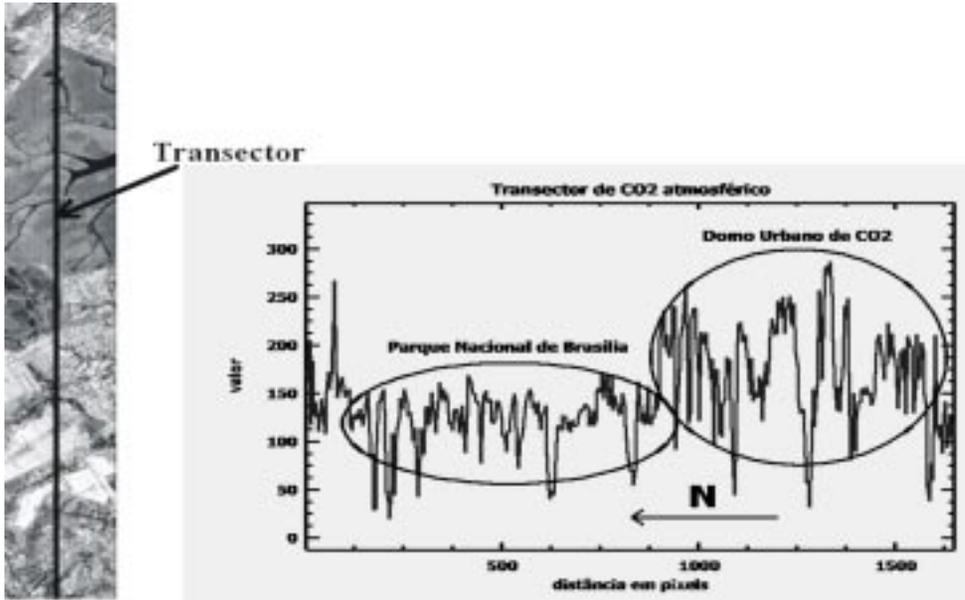
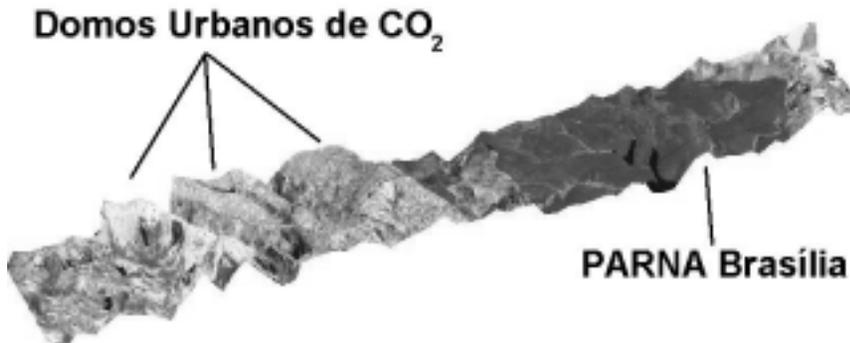


Figura 12 - Modelo digital de elevação apresentando o Parque Nacional de Brasília (PARNA) e os domos urbanos de CO₂

Modelo Digital de Elevação Imagem Hyperion



CONCLUSÃO

O presente trabalho apresentou resultados que foram obtidos baseados em estimativas feitas por meio de imageamento de sensoriamento remoto, porém o modelo testado, proposto por Rahman et al. (2000), foi desenvolvido e validado *in situ*, por meio de experimentos de campo, em zona temperada, para o mapeamento do sequestro de carbono pela vegetação durante a fase clara da fotossíntese. Os dados aqui utilizados também são de sensoriamento remoto hiperespectral, porém, para ambientes tropicais de Cerrado.

Além disso, o presente trabalho propõe a utilização de um índice para a identificação dos teores de dióxido de carbono na coluna atmosférica adjacente aos alvos, por meio do índice espectral ICO_2 .

A correlação entre o modelo proposto por Rahman et al. (2000) e o de determinação dos teores de CO_2 atmosférico foi elevada tanto para dados obtidos em plataformas aerotransportadas como para os de plataforma orbital. Os resultados obtidos com o Hyperion apresentaram o menor coeficiente de correlação (0,74), pois a cena foi obtida 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%.

O índice espectral ICO_2 aplicado sobre a imagem Hyperion permitiu a identificação do fenômeno de domos urbanos de CO_2 , tendo em vista que a imagem apresenta o contato entre unidades de conservação e áreas urbanas. Esse fenômeno indica que há uma concentração elevada de CO_2 atmosférico na coluna de ar adjacente aos alvos urbanos e tende a diminuição dessa concentração nas áreas rurais. A visualização tridimensional do resultado obtido pelo índice ICO_2 mostrou nitidamente a depressão do Parque Nacional e a alta concentração representada pelos domos nas áreas urbanas.

Novos estudos devem ser incentivados para melhor compreensão da relação espectral com os elementos do ciclo do carbono, visando melhorar sensivelmente a correlação entre feições de absorção decorrentes da fotossíntese e dos teores de CO_2 atmosférico, visando atingir o estágio de quantificação dessas relações.

AGRADECIMENTOS

O autor gostaria de agradecer ao professor Alfredo Huete da Universidade do Arizona pela cessão dos dados Hyperion e ao pesquisador Robert Green do Jet Propulsion Laboratory da NASA pela cessão dos dados AVIRIS. O autor estende seus agradecimentos aos colegas e estudantes da UCB pelas férteis discussões sobre o tema.

REFERÊNCIAS

BAPTISTA, G.M.M. **Mapeamento e Quantificação da Relação Mineralógica Caulinita/(Caulinita+Gibbsita) de Solos Tropicais, por meio dos Dados do Sensor Hiperespectral AVIRIS (JPL/NASA)**. 2001. 180p. Tese (Doutorado em Geologia). Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, 2001.

CLARK, R.N. et al. **The U.S. Geological Survey Digital Spectral Library**: Version 1: 0.2 to 3.0 mm. *U.S.G.S. Open File Report 93-592*, 1340 p, 1993.

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.

GAO, B.C.; GOETZ, A.F.H. Derivation of scaled surface reflectances from AVIRIS data. **Remote Sensing of Environment**. v. 44, p. 165-178, 1993.

GOETZ, A.F.H. Imaging spectrometry for Earth observations. **Episodes**. v. 15, n. 1, p. 7-14, 1992.

GREEN, R.O. Measuring the Spectral Expression of Carbon Dioxide in the Solar Reflected Spectrum with AVIRIS. In: **AVIRIS Workshop**, JPL/NASA, Pasadena, California. 2001. Disponível em: <http://popo.jpl.nasa.gov/docs/workshops/01_docs/2001Green_co2_web.pdf>. Acesso em 07/06/2002.

GREEN, R.O. et al. Imaging spectroscopy and the Airborne Visible/InfraRed Imaging Spectrometer (AVIRIS). **Remote Sens. Environ.** v. 65, p. 227-248, 1998.

RAHMAN, A.F. et al. Modeling CO₂ flux of boreal forests using narrow-band indices from AVIRIS imagery. **AVIRIS Workshop**, JPL/NASA, Pasadena, Califórnia, 2000.

SLATER, P.N. **Remote Sensing: optics and optical systems**. Addison-Wesley Publishing Company. Massachusetts, 1980.

Recebido em junho de 2003

Revisado em abril de 2004

Aceito em maio de 2004