

EMPREGO DA REGRESSÃO LINEAR SIMPLES NA ANÁLISE DE MISTURA ESPECTRAL

Osmar Abílio de Carvalho Júnior¹, Renato Fontes Guimarães¹,
Ana Paula Ferreira de Carvalho², Roberto Arnaldo Trancoso Gomes¹,
Éder de Souza Martins³ & Mário Diniz de Araújo Neto¹

¹UnB – Universidade de Brasília – Departamento de Geografia
Campus Universitário Darcy Ribeiro, Asa Norte, 70910-900, Brasília, DF, Brasil.
{renatofg@unb.br, osmarjr, robertogomes}@unb.br

²UnB – Universidade de Brasília – Departamento de Ecologia
Campus Universitário Darcy Ribeiro, Asa Norte, 70910-900, Brasília, DF, Brasil.
anapaula@unb.br

³EMBRAPA Cerrados – Rodovia Brasília Fortaleza, BR 20 km 18, 73310-970,
Planaltina, Distrito Federal.
eder@cpac.embrapa.br

Recebido 25 de novembro de 2003, aceito 18 de janeiro de 2004.

Resumo: A abundância relativa dos materiais pode ser determinada estabelecendo uma relação de proporcionalidade entre as formas características do espectro e sua quantidade. No caso de imagens hiperespectrais os estudos são focados nas feições de absorção diagnósticas do elemento. Normalmente os procedimentos comparam a feição espectral de referência com a da imagem. O presente trabalho objetiva avaliar o emprego da regressão linear simples na análise espectral. A regressão linear simples pode ser elaborada de duas formas considerando o termo independente como o espectro de referência ou o espectro da imagem. As duas funções apresentam distintos comportamentos na estimativa de abundância. A relação da distância entre os dois coeficientes angulares permite verificar a consistência da informação.

Palavras-chave: processamento de imagens, mistura espectral, regressão linear.

Abstract: The relative abundance of a material can be determined establishing a proportionality relationship between a characteristic of the spectrum form and its quantity. In the case of hyperspectral images analysis the studies are focused on the features of diagnostic absorption of the elements. The procedures compare a feature spectral of reference with one of the image. The present work aims to evaluate the use of the linear regression simple in the spectral analysis. The linear regression can be elaborated of two forms considering the independent term as the reference spectrum or the image spectrum. The two functions present distinct behaviors in the abundance estimate. The distance relation between the two angular coefficients enables to verify the consistency of the information.

Keywords: image processing; spectral mixture, linear regression.

INTRODUÇÃO

A alta resolução espectral dos sensores hiperespectrais torna a informação presente em cada célula da imagem próxima à obtida por meio de medições espectralradiométricas realizadas em laboratório e/ou campo (Abrams, 1986; Vane & Goetz, 1988; Kruse, 1988). Assim, o advento da espectroscopia de imageamento permitiu um avanço nas técnicas de análise espectral, o qual trabalha com a célula da imagem e seu respectivo espectro. Esse tipo de abordagem possui como embasamento o estudo das propriedades físicas da interação energia – matéria. Portanto, a análise das propriedades espectrais provê informações mais acuradas dos elementos que compõem o espectro e é menos vulnerável aos padrões de variabilidade dos dados.

Neste contexto, houve um intenso desenvolvimento na análise da mistura espectral, proveniente da integração de dois ou mais componentes distintos que

geram um comportamento espectral híbrido de seus integrantes. O espectro de uma mistura é uma combinação das reflectâncias dos membros puros ou finais presentes. Nesta abordagem as técnicas de processamento de digital buscam estabelecer os seguintes fatores: (a) os elementos que compõem a imagem, (b) a localização desses elementos e (c) a quantidade do elemento em cada célula (Carvalho Junior, 2003a,b,c).

A abundância relativa de um dado material pode ser determinada estabelecendo uma relação de proporcionalidade entre uma característica da forma do espectro e a sua quantidade (Carvalho Junior, 2003c). No caso de análise de espectros os estudos ficam focados nas feições de absorção diagnóstica dos elementos. Normalmente, como parâmetro é utilizado uma característica da feição espectral como: (a) área, (b) banda central de absorção, (c) largura, (d) albedo, (e) inflexões da curva espectral e (f) curvatura ou inclinação. Além disso, diferentes razões são estabelecidas por esses atributos, o que gera inúmeros procedimentos. As razões podem ser entre os parâmetros de uma mesma feição espectral (intra-feição) ou entre feições de materiais diferentes (inter-feição). Para uma mesma feição, tem-se, como exemplo, o método da razão entre a largura média da parte larga da feição em relação à estreita (Frouin, 1990) ou entre os seus valores máximos e mínimos de reflectância (Cloutis *et al.*, 1986; Madeira Netto *et al.*, 1997). A razão entre diferentes feições espectrais pode ser feita utilizando as respectivas bandas centrais de absorção (Madeira Netto *et al.*, 1997) ou as suas áreas (Singer, 1981; Cloutis *et al.*, 1986).

No entanto, as relações morfométricas podem também ser obtidas pelos coeficientes da regressão linear entre a feição de referência e a da célula. O

coeficiente angular entre esses espectros permite determinar uma estimativa de proporção. Assim, a partir da definição dos atributos espectrais pode-se estimar uma função matemática referente à quantidade do material existente. Essa relação pode ser linear, no caso da mistura macroscópica, ou não linear como na mistura íntima (Carvalho et al., 2004). Desta forma, o emprego da regressão linear vem sendo amplamente utilizado para a quantificação, principalmente no caso de mistura macroscópica (Johnson et al., 1983).

O presente trabalho discute o emprego do cálculo do coeficiente angular de uma regressão linear simples com objetivo de quantificar e identificar um determinado mineral na imagem considerando sua feição diagnóstica. Normalmente, nos métodos para análise de mistura espectral utilizam a regressão múltipla onde as variáveis independentes consistem nos espectros puros. Nesse trabalho é discutida a utilização do emprego da regressão linear simples, ou seja, o emprego de apenas um espectro em vez de vários, sendo uma técnica similar a abordagem realizada com a morfometria.

A área de estudo é a região de Niquelândia e as avaliações são focadas no mineral de caulinita que apresenta abundância nesta localidade.

SENSOR AVIRIS

O sensor *Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer* (AVIRIS) foi desenvolvido pela *National Aeronautics and Space Administration* (NASA), em 1983, para ser um sistema de imageamento capaz de adquirir espectros praticamente contínuos ao longo da porção do espectro solar refletido, ou seja, de 0,4 a 2,5 μm (Vane et al., 1984) (**Figura 1**). Esse sistema teve como objetivo a obtenção de dados que pudessem ser utilizados nas diversas áreas das

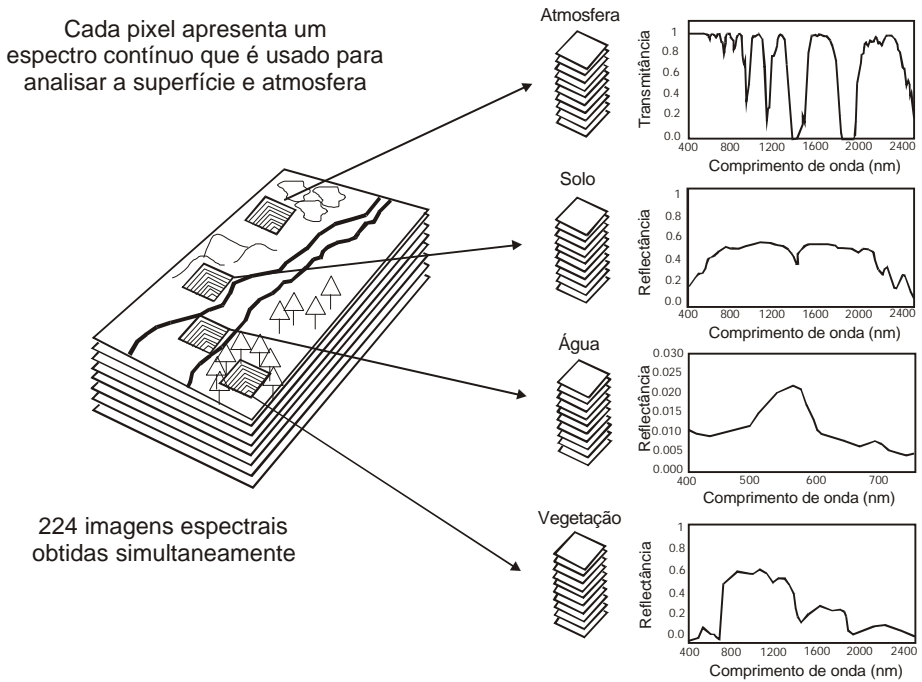


Figura 1 - Concepção do sensor hiperespectral AVIRIS, segundo a qual a alta resolução espectral torna a informação de um dado pixel próxima à obtida por meio de medições realizadas em laboratório e/ou campo. (Fonte: Green et al., 1998).

geociências. O desenvolvimento do projeto teve início em 1984, porém os primeiros vôos experimentais só começaram em 1987 (Vane, 1987). O AVIRIS tornou-se operacional em 1989, após alguns ajustes e correções realizadas pelos pesquisadores do *Jet Propulsion Laboratory* (JPL), NASA.

A equipe do JPL, em conjunto com os pesquisadores convidados, realizou diversos ajustes de hardware e, a partir de 1989, o AVIRIS passou a ser um sensor operacional sobrevoando as Américas do Norte e Central, além da Euro-

pa, durante quatro anos. A partir de 1992 as imagens obtidas pelo AVIRIS tornaram-se disponíveis.

Segundo Vane *et al.* (1993), o *design* do AVIRIS baseia-se em tecnologia de arranjo linear de detectores objetivando maximizar a qualidade dos dados e a confiabilidade do sistema. Associado a um imageamento do tipo de varredura mecânica, o sistema óptico está apto a adquirir dados ao longo das linhas no terreno. A escolha de um *scanner* do tipo *foreoptic* forçou o desenvolvimento de um complexo sistema óptico com campo de visada ampla, objetivando a obtenção de uma largura de linha compatível com as altitudes da aeronave. A opção pela varredura mecânica também permitiu que o sistema óptico se tornasse mais rápido, além de maximizar o sinal no nível focal da aeronave. Além disso, a opção pelos arranjos lineares reduziu o desafio de calibração, devido ao menor número de elementos de detector para se calibrar.

A plataforma escolhida para operações do AVIRIS foi à aeronave ER-2 de alta altitude da NASA. As vantagens destas plataformas são: (1) geralmente muito estáveis em vôo; (2) tem uma baixa relação velocidade/altura (V/H); e (3) podem obter dados locais de até 2100 km de extensão em um único vôo. A primeira vantagem permite obter imagens com boa geometria de imageamento, sendo desnecessária a retificação geométrica, principalmente para evitar a reamostragem dos dados espectrométricos. A segunda vantagem reside em uma taxa de varredura mais lenta, que permite uma integração mais longa do detector, melhorando a relação sinal/ruído. Finalmente, o alcance da aeronave torna possível a aquisição de dados de grandes áreas em um único vôo (Vane et al., 1993).

A **Figura 2** apresenta um bloco diagrama do sistema de vôo do AVIRIS com a configuração atual. Os principais subsistemas consistem de um scanner foreoptic, quatro espectrômetros, componentes de sinal eletrônico, calibrador de vôo, giroscópio, registrador de fita dos dados obtidos no vôo e o computador de controle central. Os fótons que incidem nos detetores são convertidos para um sinal elétrico análogo, amplificado, digitalizado em 12 bits e gravado em fita Metrum VLDS. Esse sistema funciona autonomamente durante o vôo. O piloto apenas emite dois tipos de comandos para o instrumento: (1) ligar, antes de decolar a aeronave e desligar, após aterrissagem e (2) acionar o registrador de fita em on/off, no princípio e fim de cada linha de vôo. O computador de controle central assume todas as outras funções. Os parâmetros de desempenho do instrumento são apresentados na **Tabela 1**. O AVIRIS tem como característica uma cobertura espectral, de 0,4 – 2,5 μm , com 224 bandas (largura de 10nm), campo de visada instantânea (IFOV), 1mrd, com resolução espacial de 20m em uma altura de 20km acoplado à aeronave ER-2.

A **Figura 3** apresenta o plano geral do *layout* do sistema óptico. O *scanner foreoptic* é conectado opticamente, por meio de fibra ótica, a quatro espectrômetros: A, B, C e D, com os seguintes intervalos nominais: A (0,4 a 0,7 mm), B (0,65 a 1,25 mm), C (1,2 a 1,82 mm) e D (1,78 a 2,40 mm). Os intervalos dos canais espectrais e as funções de resposta (FWHM) do espectro para os 224 canais são nominalmente de 10 nm. No entanto, em laboratório, essas propriedades espectrais são determinadas por canal para uma resolução melhor que 2nm (Chrien *et al.*, 1990).

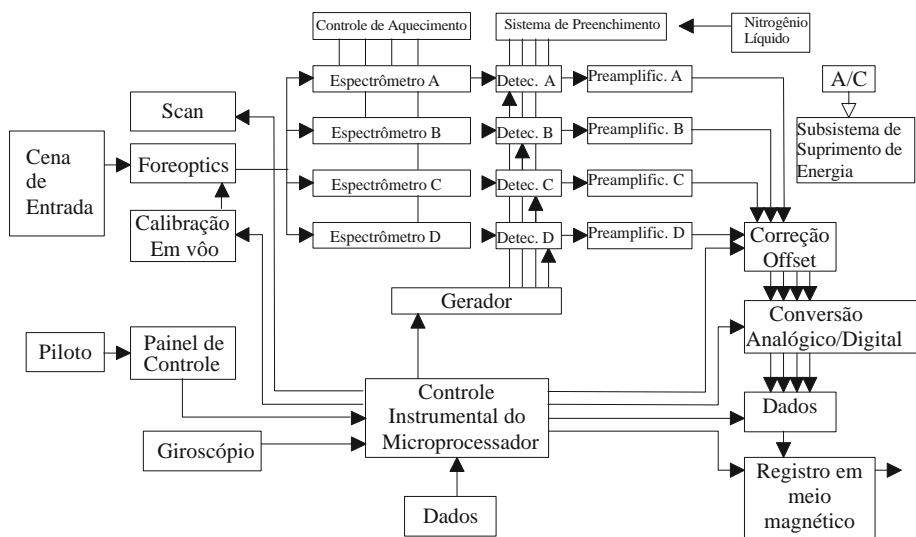


Figura 2 - Bloco Diagrama apresentando o Sistema AVIRIS (Vane et al., 1993).

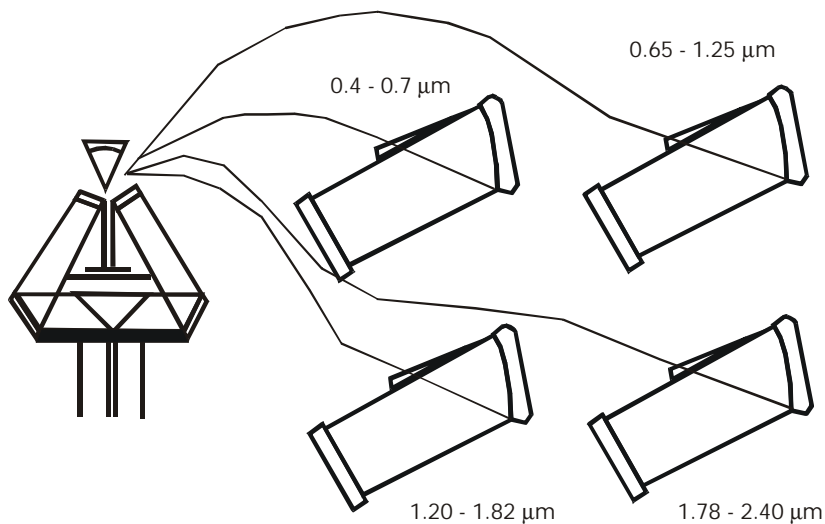


Figura 3- Layout do sistema óptico do AVIRIS (Vane et al., 1993)

Tabela 1 - Características de desempenho do AVIRIS		
Espectral		
Intervalo total imageado	400-2500 nm	
Intervalo amostrado por banda	10 nm	
Largura do canal	10 nm	
Radiométrico		
Intervalo de radiância		0 até o Lambertiano Máximo
Rasterização	Antes da estação de voo de 1993	10 bits
	A partir de 1993	12 bits
Geométrico		
Plataforma	ER-2	
Altitude (sobre nível de mar)	20 km	
Campo de visada (FOV)	33°	
Largura de imagem (614 pixels)	10,5 km	
Comprimento de imagem (máx.)	1000 km	
FOV instantâneo (IFOV)	1 mrad	
IFOV no terreno	20 m	

Os espectrômetros são mantidos a uma temperatura de $27 \pm 0,3^\circ\text{C}$, em geral, vários graus acima da temperatura ambiente. O sistema de controle termal dos espectrômetros assegura o alinhamento e a calibração espectral. Além disso, a elevada temperatura dos espectrômetros protege de condensação durante a subida e descida da aeronave.

ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo localiza-se no Maciço Máfico-Ultramáfico de Niquelândia, que contém importantes reservas de minério de níquel. As concessões de lavra dos depósitos de níquel estudados no presente trabalho pertencem à Companhia Níquel Tocantins, do Grupo Votorantim. Os jazimentos de níquel da Companhia Níquel Tocantins distam cerca de 23 km a norte da cidade de Niquelândia (**Figura 4**). A estrada que liga a cidade de Niquelândia à usina de tratamento do minério é asfaltada. O acesso às minas é feito por estradas vicinais de terra.

O estudo concentra-se na área da mina da Fazenda, principal mina em atividade da Companhia Níquel Tocantins. Por ser uma mina a céu aberto, uma área extensa é exposta evidenciando todos os horizontes do perfil de alteração. Essa mina está sobre a subzona piroxenito-peridotítica apresentando-se, em muitos aspectos, compatível com a descrição da mina Jacuba descrita por Colin et al. (1990).

MATERIAL E MÉTODOS

No presente trabalho são utilizadas imagens do sensor AVIRIS que foi trazido para o Brasil em 1995 na missão SCAR-B (Smoke, Clouds and Radiation - Brazil), que teve como propósito avaliar efeitos atmosféricos. Essa atividade foi

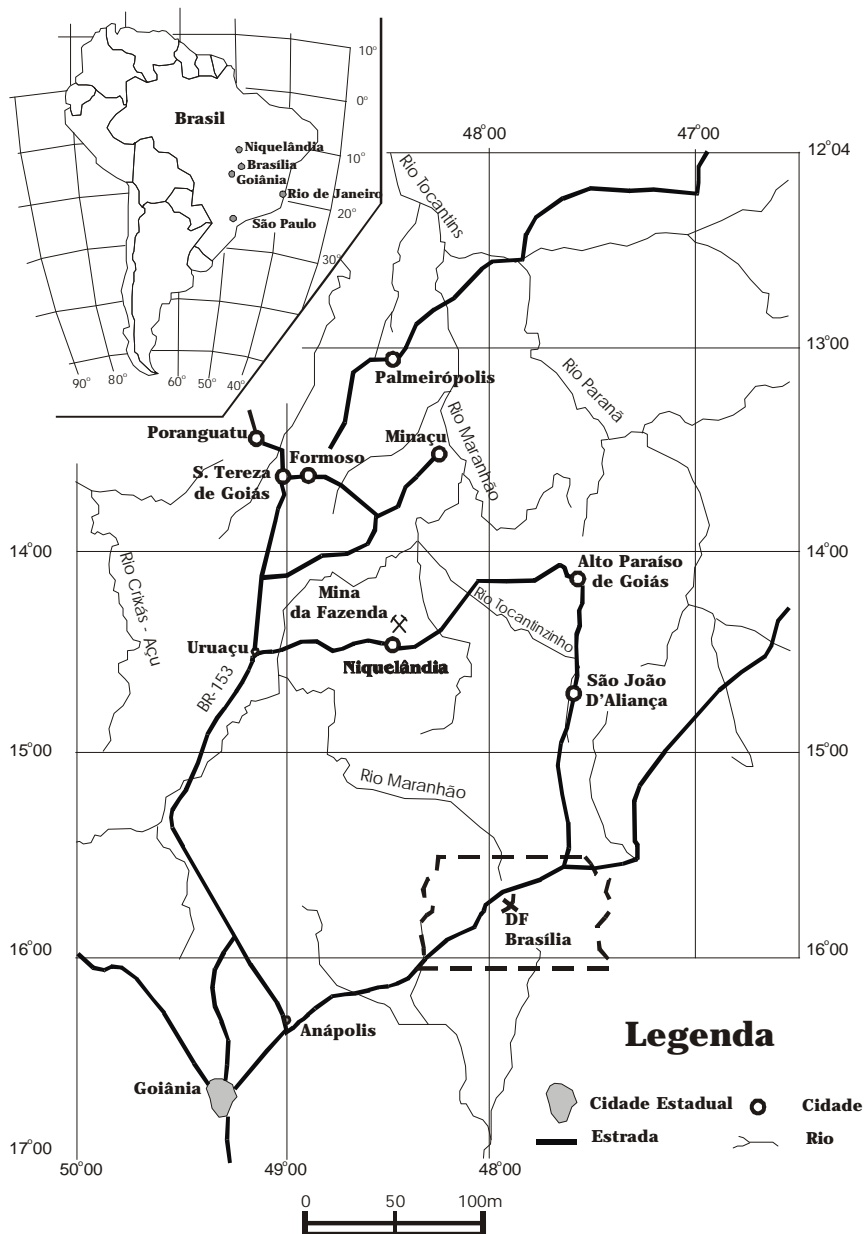


Figura 4 - Mapa de localização da região de Niquelândia

uma operação conjunta da NASA, INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais) e a AEB (Agência Espacial Brasileira) (Kaufman et al., 1998). Nesta missão, o sensor AVIRIS sobrevoou a mina Fazenda de níquel laterítico, no Maciço Máfico-Ultramáfico de Niquelândia (GO), no dia 16 de agosto de 1995.

No presente trabalho as análises são focadas no mineral caulinita que apresentam uma alta dispersão na parte superior do perfil laterítico. Esse mineral caracteriza-se pela feição espectral proveniente da ligação Al-OH em 2,2mm (Hunt *et al.* 1971).

CORREÇÃO ATMOSFÉRICA

A utilização de imagens de sensores de alta resolução espectral requer processamentos que reduzam ou compensem os efeitos atmosféricos, uma vez que diferentes fenômenos de absorção e espalhamento de gases por moléculas e aerossóis afetam o sinal recebido pelo sensor (Tanré et al., 1990).

Os dois principais métodos desenvolvidos e difundidos para a correção de imagens hiperespectrais são: Método Green (Green, 1990) e ATREM (ATmosphere REMoval program) (Gao et al., 1993; Gao et al., 1999). Comparações entre os métodos demonstram que o método Green obtém uma melhor estimativa para o espectro observado (Carvalho et al., 2002). Desta forma, a imagem foi corrigida do efeito atmosférico utilizando esse método que proporciona uma estimativa dos parâmetros atmosféricos e cálculo da reflectância aparente da superfície usando o código de transferência radiativa em conjunto com um modelo de ajuste não linear por mínimos quadrados (Green et al. 1991, 1993). Inicialmente, Green (1990) utilizou o código de transferência radiativa LOWTRAN (Keneizys et al. 1988), que foi, posteriormente, substituído por

Green et al. (1993) pelo MODTRAN 3 (Berk et al. 1989, Anderson et al. 1995).

COEFICIENTES DA EQUAÇÃO LINEAR

Os coeficientes da equação da reta apresentam diferenças conforme a elaboração da regressão, podendo ter o termo dependente (Y) igual ao espectro de referência (Er) e o termo independente (X) igual ao espectro da imagem (Ei) ou o inverso onde Y é o Ei, enquanto X é o Er.

Regressão Linear Simples onde Y=Ei

Na regressão linear onde Y=Ei os coeficientes angulares e lineares podem ser calculados pelas seguintes formulações:

$$B_{y=ei} = \frac{\sum EiEr - \frac{\sum Ei \sum Er}{n}}{\sum Er^2 - \frac{(\sum Er)^2}{n}} \quad (1)$$

$$A_{y=ei} = \frac{\sum Ei - B_{y=ei} \sum Er}{n} \quad (2)$$

A **Figura 5** apresenta as imagens referentes aos coeficientes $B_{Y=Ei}$ e $A_{Y=Ei}$ para a feição espectral do mineral caulinita. Os valores negativos do coeficiente angular se apresentam na imagem com tonalidade escura. Estes correspondem às áreas com correlação negativa onde inexistente a feição procurada. As localidades com a presença de caulinita em alta proporção dentro da célula apresentam-se como áreas de tonalidade clara. No entanto, nem todas as áreas claras são áreas com presença de caulinita. A imagem do coeficiente linear apresenta em geral um comportamento inverso.

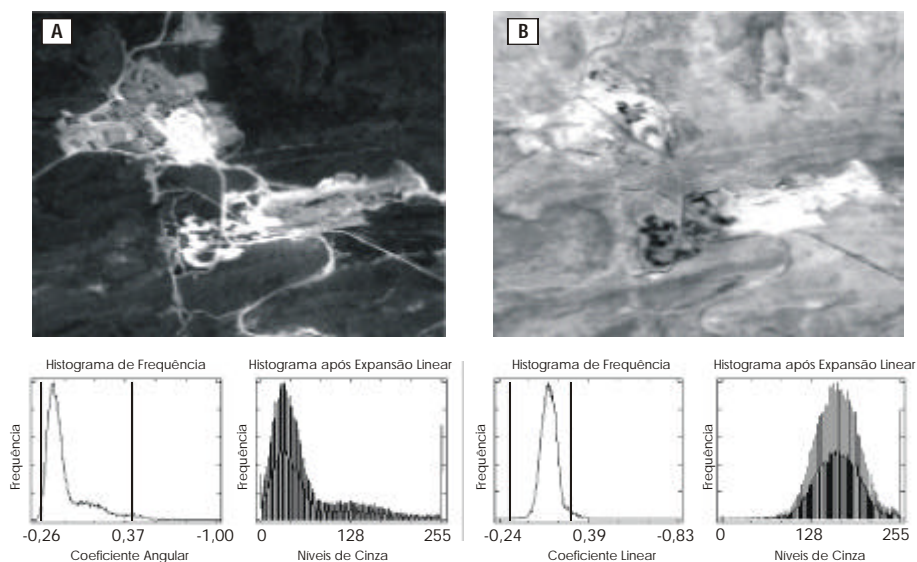


Figura 5 – Imagens dos coeficientes (a) $B_{Y=Ei}$ e (b) $A_{Y=Ei}$ para a feijão da caulinita.

Regressão Linear Simples onde $Y=Er$

Na regressão linear onde $Y=Er$ os coeficientes angulares e lineares são calculados pelas mesmas formulações do $Y=Ei$ trocando os valores de Ei por Er e vice-versa:

$$B_{y=Er} = \frac{\sum EiEr - \frac{\sum Ei \sum Er}{n}}{\sum Ei^2 - \frac{(\sum Ei)^2}{n}} \quad (3)$$

$$A_{y=Er} = \frac{\sum Er - B_{y=Er} \sum Ei}{n} \quad (4)$$

Na regressão $Y=Er$ os valores do coeficiente angular pode ser subdivido em quatro tipos:

- Valor de $B_{Y=Er}$ superior a 1 ($B_{Y=Er} > 1$) – A curva da imagem possui dimensão menor que a curva referência. A relação $1/B_{Y=Er}$ demonstra uma proporção entre as curvas, variando de 0 e a 1 conforme o afastamento ou proximidade da curva de referência, respectivamente. Por exemplo, se for obtido um valor de B igual a 2, tem-se na curva observada a metade da quantidade do elemento da curva referência;
- Valor de $B_{Y=Er}$ igual a 1 ($B_{Y=Er} = 1$) – A curva da imagem apresenta a mesma quantidade do elemento que a curva referência;
- Valor de $B_{Y=Er}$ entre 0 e 1 ($0 < B_{Y=Er} < 1$) – A curva da imagem possui uma dimensão maior que a curva referência, o índice $1/B_{Y=Er}$ demonstra essa proporção. No entanto, nesses casos é importante ressaltar que a curva de referência é usualmente proveniente de bibliotecas espectrais ou de membros finais que já representam valores extremos de intensidade da feição em análise. Portanto, valores de $1/B_{Y=Er}$ um pouco mais altos são indicativos de que não se trata do elemento procurado; e
- Valor negativo de $B_{Y=Er}$ ($-B_{Y=Er}$) – Presença de correlação negativa entre as curvas em análise. Neste caso considera-se inexistente o elemento procurado.

As imagens $B_{Y=Er}$ apresentam uma escala de valores muito ampla. Como exemplificação é demonstrada a imagem de $B_{Y=Er}$ para caulinita com seu

respectivo histograma que demonstra uma variação de -11.19 a 11.75 . A imagem $A_{Y=Er}$ apresenta visualmente um comportamento inverso ao do $B_{Y=Er}$ (**Figura 6**).

A obtenção de proporção entre as curvas é definida pela razão $1/B_{Y=Er}$. No entanto, deve-se desconsiderar os valores da razão $1/B_{Y=Er}$ que apresentem valores inconsistentes como os de correlação negativa e entre $0 < B_{Y=Er} < 1$. Esse fato pode ser constatado pela visualização da imagem $1/B_{Y=Er}$, para a feição da caulinita que se apresenta extremamente ruidosa (**Figura 7a**). A eliminação dos pontos ruidosos, localizados entre valores ($B_{Y=Er} < 1$), permite enfatizar

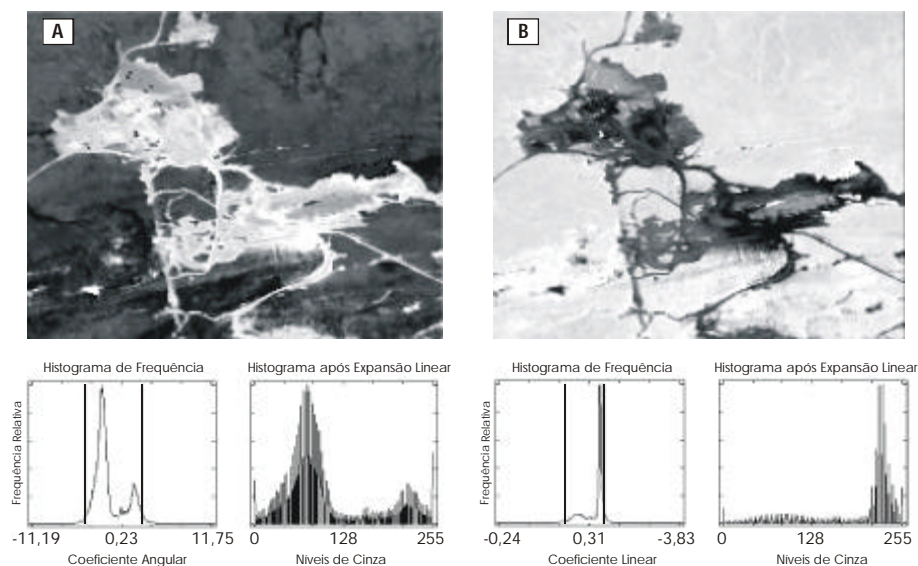


Figura 6 – Imagem para a feição da caulinita dos coeficientes (a) $B_{Y=Er}$ e (b)

$A_{Y=Er}$.

as áreas de interesse tornando a escala de valores compatível com a proporcionalidade do material existente (**Figura 7b**).

DISTÂNCIA ENTRE OS COEFICIENTES ANGULARES

Nas localidades onde existe o material procurado $B_{Y=Er}$ e $1/B_{Y=Er}$ tendem a se igualar:

$$B_{y=ei} = \frac{1}{B_{y=Er}} \quad (5)$$

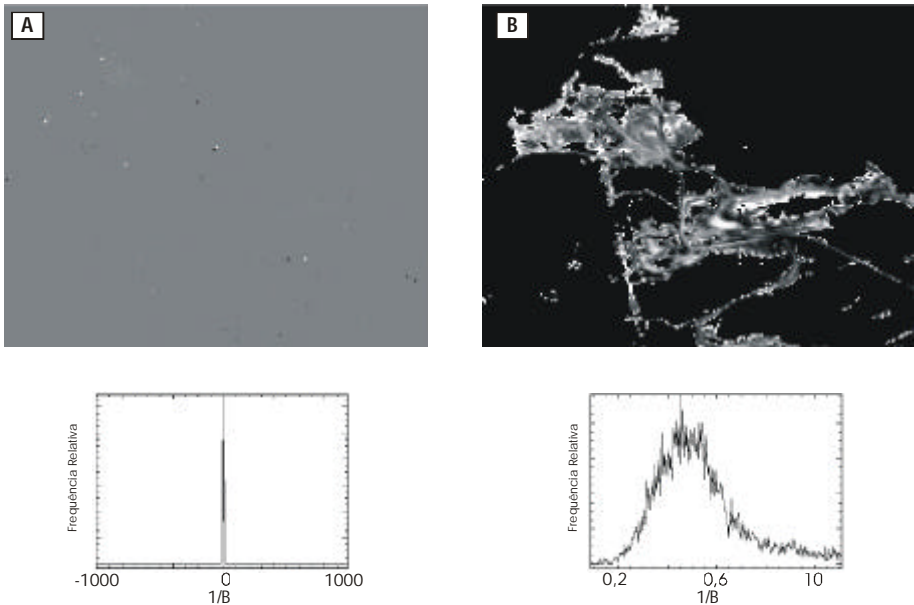


Figura 7 – Imagem $1/B_{Y=Er}$ para a feição da caulinita: (a) considerando todos os valores e (b) considerando apenas os valores significativos após uma filtragem.

O gráfico de dispersão entre $B_{Y=EI}$ e $1/B_{Y=Er}$ apresenta as células com a feição do espectro de referência posicionados ao longo da função $f(x) = x$ (**Figura 8a, b**). Quanto mais próximo o ponto estiver da reta maior é a similaridade entre os espectros da imagem com o de referência. Desta forma, o grau de similaridade é expresso como a distância perpendicular do ponto à reta da função $f(x)=x$, representada na **Figura 8c** como a seta L1. Para os pontos sobrepostos à reta, a proporção do elemento é indicada pelo valor em qualquer um dos eixos (seta L2 e L3). Na **Figura 8c** essas setas sinalizam uma relação de abundância para o elemento em análise.

Assim a inserção da reta $f(x)=x$ no diagrama entre $B_{Y=EI}$ e $1/B_{Y=Er}$ permite balizar uma análise tanto para identificação como quantificação do material. A identificação da presença ou não do elemento procurado pode ser estabelecida pelo índice de similaridade determinado pela distância entre os coeficientes angulares (DCA), que expressa o comportamento descrito conforme a seguinte equação:

$$DCA = \sqrt{\left(B_{y=ei} - \frac{1}{B_{y=Er}}\right)^2} \quad (6)$$

Quanto menor o valor da DCA, maior é a similaridade do espectro do pixel com o espectro de referência. Um limite de erro aceitável para a caulinita pode ser estabelecido em torno de 0,15. Para as áreas de interesse ficarem claras pode-se realizar a inversão dos dados multiplicando por (-1) e somando-se de 0,15. Desta forma os valores de DCA variam de 0 até 0,15, sendo os valores mais próximos de 0,15 os mais significativos.

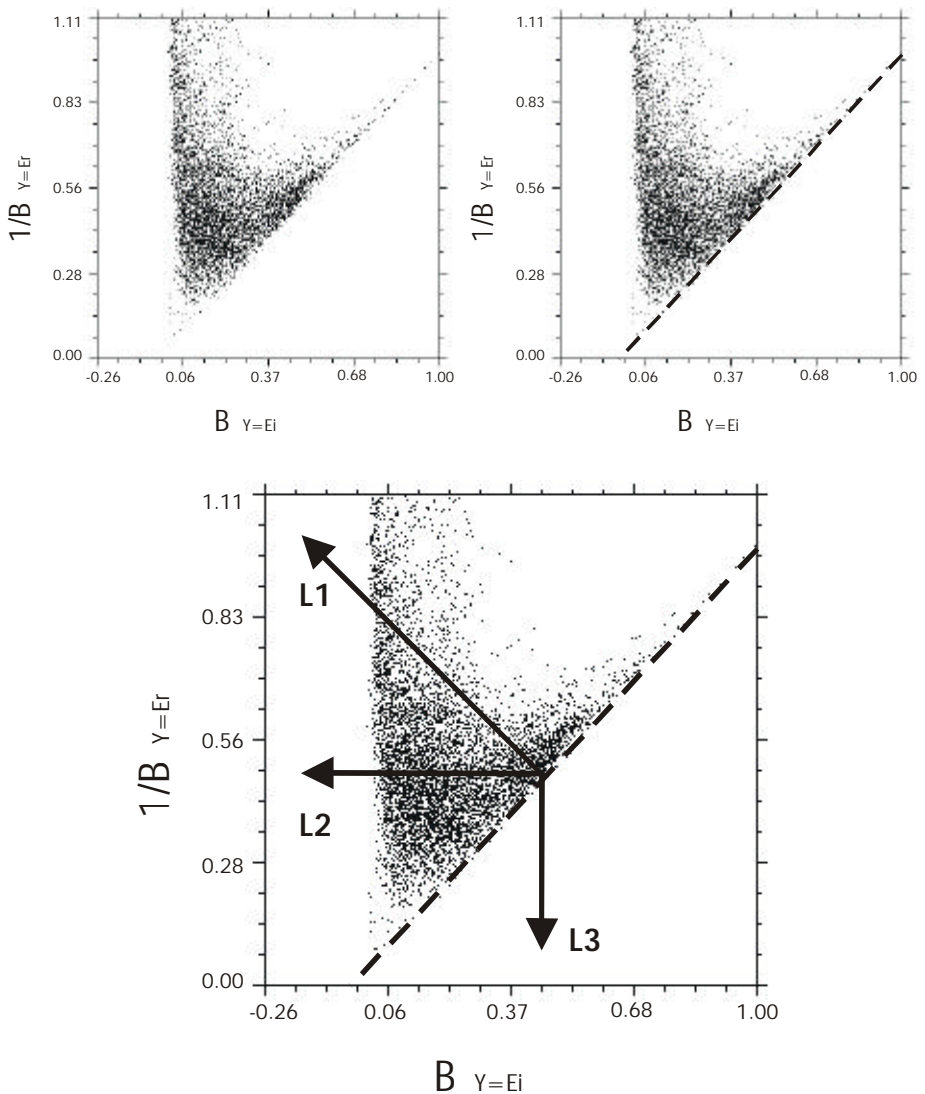


Figura 8 – Gráficos de dispersão entre $B_{Y=Er}$ e $1/B_{Y=Er}$: (a) disposição dos pontos, (b) inserção da reta referente a $f(x) = x$, e (c) inserção da seta referente ao grau de similaridade (L1) e das setas que demonstram a proporcionalidade entre os valores $B_{Y=Er}$ e $1/B_{Y=Er}$ (L2 e L3).

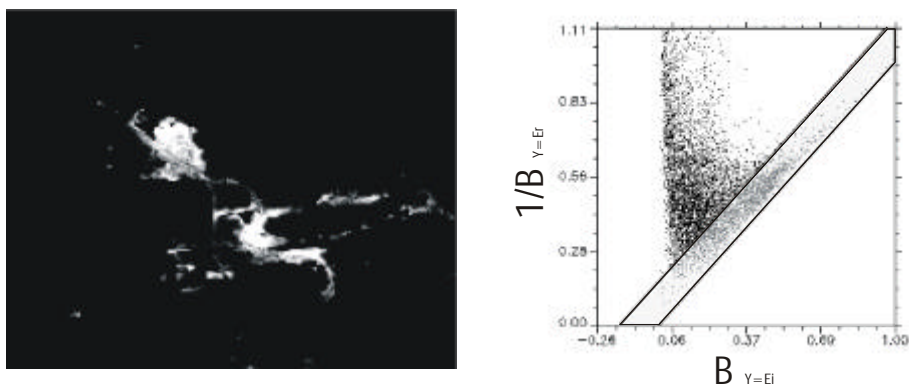


Figura 9 - Imagem DCA para a feição da caulinita e o posicionamento dos pixels considerados no gráfico de dispersão entre $B_{Y=Er}$ e $1/B_{Y=Er}$.

A imagem do índice para a feição da caulinita é apresentada na **Figura 9**. As áreas claras são às localidades com a ocorrência das feições, contrapondo-se às áreas escuras, onde não há ocorrência. Dentro das áreas claras, a variação tonal representa a similaridade existente com o espectro de referência. No gráfico de dispersão estão demarcadas as áreas com a distância de 0,15 do eixo de igual valor de $B_{Y=Er}$ e $1/B_{Y=Er}$. Estas áreas do gráfico são claras na imagem DCA. As demais áreas adquirem valor nulo e são negligenciadas devido à inexistência da feição.

O índice proposto possui uma alta similaridade com o coeficiente de correlação (R) demonstrando a eficiência do método (**Figura 10a**). Os pontos com menor ajuste são os referentes às áreas com menores proporções de caulinita (áreas sombreadas) (**Figura 10b**). Isto demonstra uma menor eficiência do índice para baixas concentrações onde ocorre um aumento do ruído e proporção.

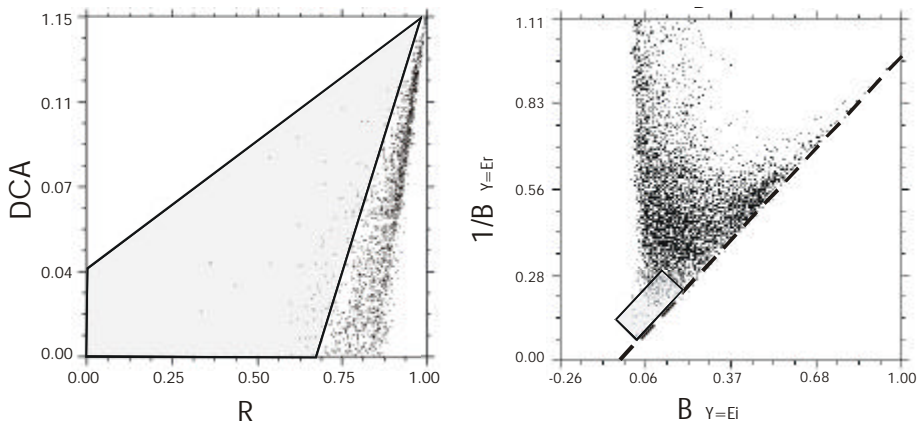


Figura 10 – Gráficos de dispersão entre: (a) R e DCA e (b) $B_{Y=Ei}$ e $1/B_{Y=Er}$.

Nesse caso, pode-se definir um valor de corte que elimine esses pontos com baixa concentração. Esse algoritmo foi desenvolvido pelos autores em IDL rodando dentro do programa comercial “Environment for Visualizing Images” (ENVI).

REMOÇÃO DO CONTÍNUO

As análises dos coeficientes angulares também podem ser realizadas em espectros que sofreram remoção do contínuo. O contínuo é uma função matemática usada para isolar as feições espectrais que corresponde a um sinal de background não relacionado a nenhuma feição de absorção específica. O contínuo é removido pela divisão do espectro original com o seu respectivo contínuo. Inicialmente, esse procedimento foi utilizado para análise de mistura espectral em laboratórios (Clark, 1981; McCord *et al.*, 1981; Clark, 1983; Clark & Lucey, 1984; Singer, 1981) sendo, posteriormente, transferido para o tratamento de dados hiperespectrais (Clark *et al.*, 1990). Normalmente, a partir da remoção

do contínuo é realizado o cálculo da profundidade da banda que considera apenas a banda de maior intensidade da feição de absorção do espectro de referência em relação à linha do contínuo. Desta forma, a profundidade (Pf) da feição de absorção foi descrita matematicamente por Clark & Roush (1984) como:

$$Pf = 1 - \frac{Rb}{Rc} = \frac{Rc - Rb}{Rc} \quad (7)$$

Onde “Pf” é a profundidade da banda de absorção, “Rb” é a reflectância da banda central de absorção e “Rc” é a reflectância do contínuo na banda central de absorção. Para obter o valor em porcentagem pode-se utilizar o índice escala, que estabelece uma relação entre a banda profundidade da imagem e um espectro de referência.

O coeficiente angular desses espectros removidos do contínuo apresenta uma alta correlação com o índice escala. A **Figura 11** apresenta as imagens para a feição da caulinita do índice escala e dos coeficientes angulares após remoção do contínuo. Nos gráficos de dispersão que apresentam o coeficiente $1/B_{Y=Er}$ observa-se que a reta com valores próximos a zero correspondem a espectros que não possuem caulinita.

CONCLUSÃO

A regressão linear entre o espectro da imagem e o espectro de referência é um importante método para o cálculo de abundância. O emprego da regressão linear simples permite uma análise parcial da mistura espectral. Essa função pode ser elaborada de duas formas sendo que o procedimento onde o termo depen-

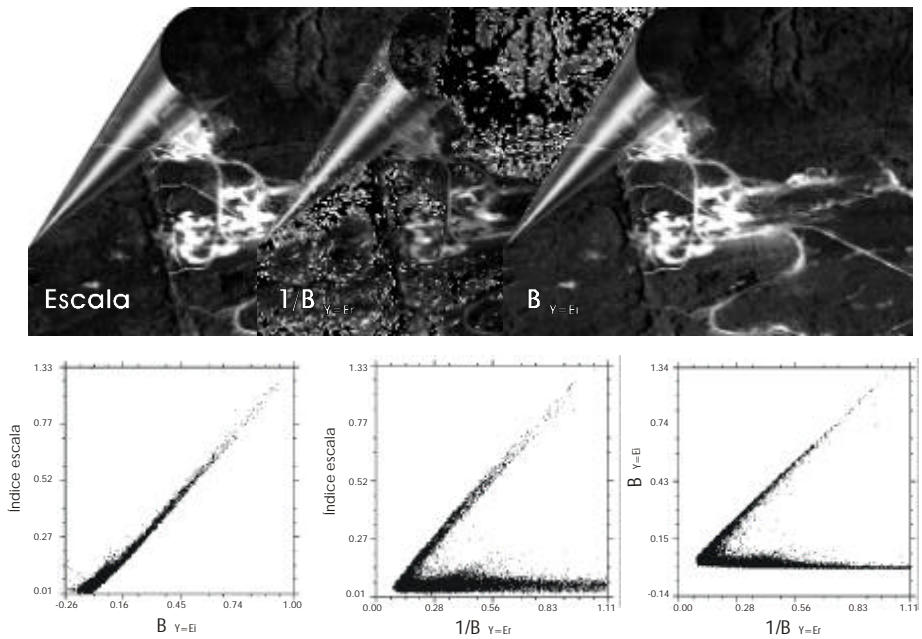


Figura 11 – Imagens e os gráficos de dispersão entre as imagens: escala, $1/B_{Y=Er}$ e $B_{Y=Er}$.

dente é o espectro da imagem é de mais fácil implementação matemática. Apesar do coeficiente angular ser apropriado para a quantificação apresenta limitações para definir a existência do elemento no pixel. Este problema pode ser resolvido a partir de um índice DCA elaborado a partir da conjunção das duas funções que se mostra bastante eficiente no processo de identificação. Os valores do coeficiente angular para os espectros removidos do contínuo demonstram uma alta correlação com os valores obtidos com o índice escada.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) a concessão das imagens AVIRIS, ao CNPq pelo financiamento de bolsas de pesquisa para aos autores Osmar Abílio de Carvalho Júnior e Renato Fontes Guimarães, e aos consultores da revista Espaço & Geografia pelas correções e sugestões feitas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABRAMS, M. G. 1986. Imaging Spectrometry: Aircraft and Space Program. In: *Proceedings of Int. Geosci. Remote Sensing Symp.*, Zurich, ESA, Vol. 1, pp.231-234.
- ANDERSON, G. P.; WANG, J., CHETWYND, J. H. 1995. MODTRAN3: An update and recent validations against airborne high-resolution interferometer measurements. In: Annual JPL Airborne Earth Science Workshop, 5, Pasadena, CA, Summaries, JPL Publication 95-1, 5-8.
- BERK, A., BERNSTEIN, L. S. & ROBERTSON, D. C. 1989. MODTRAN: A moderate resolution model for LOWTRAN7. Final report, GL-TR-0122, AFGL, Hanscomb AFB, MA, 42p.
- CARVALHO JUNIOR, O.A., LATORRE, M., DIAS L.A.V., CARVALHO, A.P.F., GUIMARÃES, R.F. & MENESES, P.R. 2002. Comparação dos métodos Green e ATREM para correção atmosférica de imagens hiperespectrais AVIRIS. Espaço & Geografia, 5(1): 179-197.
- CARVALHO JUNIOR, O. A.; CARVALHO, A. P. F.; GUIMARÃES, R. F.; MENESES, P. R.; SHIMABUKURO, Y. 2003a. Mistura espectral: (I) detecção dos membros finais utilizando a geometria do Simplex. Espaço Geografia, 6(1): 147-173.

- CARVALHO JUNIOR, O. A.; CARVALHO, A. P. F.; GUIMARÃES, R. F.; MENESES, P. R.; SHIMABUKURO, Y. 2003b. Mistura espectral: (II) Classificadores espectrais para identificação. Espaço e Geografia, Brasília, 6(1): 175-198.
- CARVALHO JUNIOR, O. A.; CARVALHO, A. P. F.; GUIMARÃES, R. F.; MENESES, P. R.; SHIMABUKURO, Y. 2003c. Mistura espectral: (III) Métodos para estimativa de abundância. Espaço e Geografia, Brasília, 6(1): 199-222.
- CARVALHO JUNIOR, O.A.; CARVALHO, A.P.F.; MENESES, P.R.; GUIMARÃES, R.F.; MARTINS, E.S. 2003d. Análise de imagens hiperespectrais pelo método Multiple Endmember Spectral Mixture Analysis (MESMA) em depósito supergênico de níquel. Revista Brasileira de Geociências, 33(1): 63-74.
- CARVALHO JUNIOR, O.A.; MARTINS, E.S.; CARVALHO, A.P.F.; MENESES, P.R.; GUIMARÃES, R.F.; CARDOSO, F.B.F. 2004. Cálculo da abundância de minerais de depósito de níquel da Mina Fazenda por espectroradiometria. Revista Brasileira de Geociências, 34(4): 579-586.
- CHRIEN, T. G., GREEN, R. O. & EASTWOOD, M. 1990. Accuracy of spectral and radiometric laboratory calibration of the Airborne Visible/ Infrared Imaging Spectrometer. In: Annual JPL Airborne Visible / Infrared Imaging Spectrometer (AVIRIS) Workshop, 2, Pasadena, CA, Summaries, JPL-Publication 90-54, pp. 1-14.
- CLARK, R.N. 1981. Water frost and ice: The near spectral reflectance 0.65-2.5 μ m, Journal of Geophysical Research 86: 3087-3096.
- CLARK, R.N. 1983. Spectral properties of mixtures of montmorillonite and dark carbon grains: Implications for remote sensing minerals containing chemically and physically adsorbed water. Journal of Geophysical Research 88: 10635-10644.
- CLARK, R.N. & LUCEY, P.G. 1984. Spectral properties of ice-particulate mixtures and implications for remote sensing. I - Intimate mixtures. Journal of Geophysical Research 89: 6341-6348.

- CLARK, R.N. & ROUSH, T.L. 1984. Reflectance spectroscopy: Quantitative analysis techniques for remote sensing applications. *Journal of Geophysical Research* 89: 6329-6340.
- CLARK, R.N., GALLAGHER, A.J. & SWAYZE, G.A. 1990. Material absorption band depth mapping of imaging spectrometer data using a complete band shape least-squares fit with library reference spectra In: *Annual JPL Airborne Geosciences Workshop, 2., Pasadena, CA, Summaries, JPL-Publication 90-54*, 176-186.
- CLOUTIS, E. A., GAFFEY, M. J., JACKOWSKI, T. L., REED, K. L. 1986. Calibrations of Phase Abundance, Composition, and Particle Size Distribution for Olivine – Orthopyroxene Mixtures from Reflectance Spectra. *Journal of Geophysical Research* 91(B11): 11641-11653.
- COLIN, F., NAHON, D., TRESCASES, J.J. & MELFI, A.J. 1990. Lateritic weathering of pyroxenites at Niquelandia, Góias, Brazil: the supergene behavior of nickel. *Economic Geology*, 85:1010-1023
- GAO, B-C., HEIDEBRECHT, K.B. & GOETZ, A.F.H. 1993. Derivation of scaled surface reflectances from AVIRIS data. *Remote Sensing of Environment*. 44:165-178.
- GAO, B-C., HEIDEBRECHT, K.B., & GOETZ, A.F.H. 1999. *Atmosphere Removal Program (ATREM). User's Guide version 3.1*. 101p.
- GREEN, R. O. 1990, Retrieval of reflectance from calibrated radiance imagery measured by the Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer (AVIRIS) for lithological mapping of Clark Mountains, California. In: *Annual JPL Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer (AVIRIS) Workshop, 2, Pasadena, CA, Summaries, JPL-Publication 90-54*, 167-175.
- GREEN, R. O. 1991. Retrieval of reflectance from AVIRIS – measured radiance using a radioactive transfer code. In: *Annual JPL Airborne Visible/Infrared Imaging*

Spectrometer (AVIRIS) Workshop, 3, Pasadena, CA, Summaries, JPL Publication 91-28, 200-210.

GREEN, R. O., CONEL, J. E., MARGOLIS, J. S., BRUEGGE, J. & HOOVER, G. L. 1991. An inversion algorithm for retrieval at atmospheric and leaf water absorption from AVIRIS radiance with compensation for atmospheric scattering. In: Annual JPL Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer (AVIRIS) Workshop, 3, Pasadena, CA, Summaries, JPL-Publication 91-28, 51-61.

GREEN, R. O., CONEL, J. E. & ROBERTS, D. A. 1993. Estimation of aerosol optical depth, and additional atmospheric parameters for the calculation of apparent reflectance from radiance measured by the airborne visible/infrared imaging spectrometer. In: Annual JPL Airborne Earth Science Workshop, 4, Pasadena, CA, Summaries, JPL-Publication 93-26, 83-86.

GREEN, R. O., EASTWOOD M. L., SARTURE, C. M., CHRIEN, T. G., ARONSSON, M., CHIPPENDALE, B. J., FAUST, J. A., PAVRI, B. E., CHOVI, C. J., SOLIS, M., OLAH, M. R. & WILLIAMS O. 1998. Imaging Spectroscopy and the Airborne Visible / Infrared Imaging Spectrometer (AVIRIS). *Remote Sensing of Environment* 65:227-248.

HUNT, GR., SALISBURY, J.W. & LENHOFF, C.J. 1971. Visible and near infrared spectra of minerals and rocks. III - Oxides and hydroxides. *Modern Geology*, 3: 195-205.

JOHNSON, P. E., SMITH, M. O., TAYLOR-GEORGE, S., ADAMS, J. B. 1983. A semi-empirical method for analysis of the reflectance spectra of binary mineral mixtures. *Journal of Geophysical Research* 88: 3557-3561.

KAUFMAN, Y. J., HOBBS, P. V., KIRCHHOFF, V. W. J. H., ARTAXO, P., REMER, L. A., HOLBEN, B. N., KING, M. D., WARD, D. E., PRINS, E. M., LONGO, K. M., MATTOS, L. F., NOBRE, C. A., SPINHIRNE, J. D., JI, O., THOMPSON, A. M., GLEASON, J. F.,

- CHRISTOPHER, S. A., TSAY S. C. 1998. Smoke, Clouds, and Radiation-Brazil (SCAR-B) experiment. *Journal of Geophysical Research* 103(D24): 31.783-31.808.
- KRUSE, F. A. 1988. Use of Airborne Imaging Spectrometer data to map minerals associated with hydrothermally-altered rocks in the Northern Grapevine Mountains, Nevada and California. *Remote Sensing of Environment* 24:31-52.
- MADEIRA NETTO, J. S.; BÉDIDI, A.; CERVELLE, B.; POUGET, M. & FLAY, N. 1997. Visible spectrometric indices of hematite (Hm) and Goethite (Gt) content in lateritic soils: the application of Thematic Mapper (TM) image for soil-mapping in Brasilia, Brazil. *International Journal of Remote Sensing* 18(13): 2835-2852.
- MCCORD, T.B.; CLARK, R.N.; HAWKE, B.R., MACFADDEN, L.A.; OWENSBY, P.D.; PIETERS, C.M., ADAMS, J.B. 1981. Moon: Near-infrared spectral reflectance, a first good look. *Journal of Geophysical Research* 86:10883-10892.
- SINGER, R. B. 1981. Near-infrared reflectance of mineral mixtures: Systematic combinations of pyroxenes, olivine, and iron oxides. *Journal of Geophysical Research* 86: 7967-7982.
- SINGER, R.B. 1981. Near-infrared reflectance of mineral mixtures: Systematic combinations of pyroxenes, olivine, and iron oxides. *Journal of Geophysical Research* 86: 7967-7982.
- VANE G. & GOETZ, A., F. H. 1988. Terrestrial Imaging Spectrometry, *Remote Sensing of Environment* 24:1-29.
- VANE, G. 1987. First results from the Airborne Visible/Infrared imaging, Spectrometer (AVIRIS). *Proc. Soc. Photo-Opt. Instrum. Eng. (SPIE)*, 834:166-174.
- VANE, G., CHRISP, M., ENMARK, H., MACENKA, S. & SOLOMON, J. 1984. Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer (AVIRIS): an advanced tool for earth remote sensing, In: *Proc. 1984 IEEE Int. Geosci. Remote Sensing Symp., SP215, IEEE, New York, 751-757.*

VANE, G., GREEN, R. O., CHRIEN, T. G., ENMARK, H. T., HANSEN, E. G. & PORTER, W. M. 1993. The airborne visible/infrared imaging spectrometer (AVIRIS). Remote Sensing of Environment 44:127-143.