
MAPEAMENTO DOS TEORES DE ARGILA DE SOLOS TROPICAIS, POR MEIO DE DADOS DE SENSORIAMENTO REMOTO MULTIESPECTRAL (ASTER) E HIPERESPECTRAL (AVIRIS)¹

Gustavo Macedo de Mello Baptista
Professor do Departamento de Geografia da UPIS

Dr. José da Silva Madeira Netto
Pesquisador da Embrapa Cerrados

Dr. Paulo Roberto Meneses
Professor Adjunto do Instituto de Geociências da Universidade de Brasília

RESUMO: *O presente trabalho visa determinar uma metodologia, a partir de dados de reflectância espectral, que permita mapear os teores de argila das manchas de solos expostos. A determinação de IText, como índice proporcional aos teores de argila, mostrou que o procedimento é bastante eficaz e que pode ser adotado tanto para dados de sensores multiespectrais (ASTER) como para dados hiperespectrais (AVIRIS), sendo que os resultados obtidos para o AVIRIS apresentam-se mais precisos, pois, com bandas mais estreitas, apresentam menos influência de misturas espectrais de outros elementos componentes da cena.*

Palavras chaves: Sensoriamento remoto, textura de solos, ASTER, AVIRIS.

ABSTRACT: *The present work seeks to determine a methodology, using spectral data, that allows mapping the clay contents of bare soils' spots. The determination of IText, as proportional index to the clay contents, showed that the procedure is effective enough and that can be adopted for data of multispectral sensors (ASTER) as well as for hyperspectral data (AVIRIS), and the results obtained for AVIRIS are more precise because, with narrow bands, they suffer less spectral mixtures influence of another component elements of the scene.*

Key words: Remote sensing, soil's texture, ASTER, AVIRIS

1 - INTRODUÇÃO

O estudo espectral dos diversos componentes da superfície terrestre tem permitido a extração dos mais variados tipos de informação, tais como teores de hematita (Madeira Netto et

al., 1997), relação sílica-alumina (Madeira Netto et al., 1995; Baptista et al., 1998b), entre outros. Madeira Netto (1993) propõe uma razão de bandas para o sensor TM5 do Landsat, baseada no comportamento espectral, para a determinação da textura dos solos na região de Brasília, DF.

¹ Parte da Tese de Doutorado em Geologia no Instituto de Geociências da Universidade de Brasília, do primeiro autor, a ser defendida no segundo semestre de 2000.

O objetivo deste trabalho é adequar uma metodologia baseada na modelagem matemática de bandas de sensores remotos multi e hiperespectrais, visando a espacialização dos diferentes teores de argila em um mancha de solo exposto, situada no município de São João D'Aliança, Goiás. Esta área foi escolhida porque foi uma das áreas imageadas pelo sensor hiperespectral AVIRIS (*Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer*) de propriedade do *Jet Propulsion Laboratory* (JPL/NASA), quando da realização da missão SCAR-B (*Smoke, Clouds and Radiation - Brazil*) em agosto e setembro de 1995. Os dados multiespectrais utilizados neste trabalho foram simulados a partir da convolução dos dados AVIRIS para o sensor ASTER que foi colocado em órbita em meados de 1998.

2 - CARACTERÍSTICAS ESPECTRAIS DE COMPONENTES MINERAIS DE SOLOS TROPICAIS UTILIZADOS PARA A DETERMINAÇÃO DOS TEORES DE ARGILA

As proporções dos componentes minerais caulinita e gibbsita são importantes para a classificação e implicam em propriedades que influem nas práticas de manejo dos solos. O conhecimento dos espectros de reflectância desses minerais é fundamental para utilização da espectrometria de imageamento em estudos de determinação de teores de argila de solos tropicais, como subsídio ao conhecimento dos materiais de origem

2.1 - Caulinita ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$)

A caulinita é o argilomineral mais freqüentemente encontrado nos solos tropicais. Ela é formada nos solos por meio do intemperismo ou ainda nas rochas pela alteração hidrotermal de aluminossilicatos,

particularmente o feldspato. Seu espectro de reflectância possui feições características na região do infravermelho refletido (Hunt e Salisbury, 1970; Hunt et al., 1973).

Suas principais feições estão associadas a vibrações moleculares das hidroxilas (OH^-) em seu retículo cristalino. No infravermelho próximo, as feições mais perceptíveis estão associadas às harmônicas de alongamentos de ligação (2s) em $1,4 \mu\text{m}$ e as combinações envolvendo o alongamento do OH^- e as curvaturas de ligação entre Al-OH (d + s), em $2,2 \mu\text{m}$ aproximadamente (Hlavay et al., 1977).

Hunt et al. (1973) consideraram que a intensidade da feição da caulinita a $2,2 \mu\text{m}$ está associada às duas camadas dioctaédricas da estrutura do mineral. A banda de absorção fraca da água próxima a $1,9 \mu\text{m}$ indica a presença de água molecular absorvida e não água constitucional, como ocorre, por exemplo, na montmorillonita ($(\text{Al}, \text{Mg})_{2-3}\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$) (Figura 1).

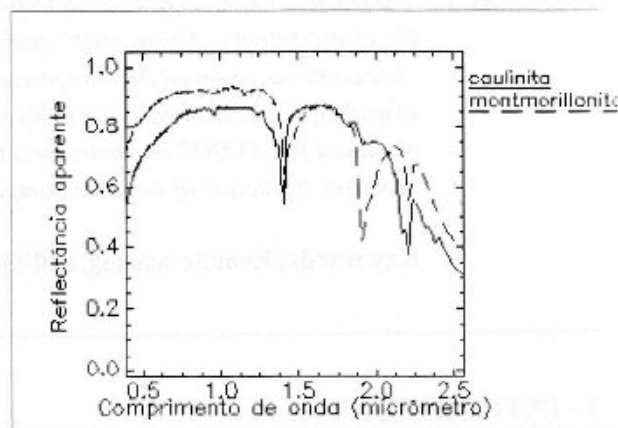


Figura 1 – Espectros de reflectância da caulinita ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$) e da montmorillonita ($(\text{Al}, \text{Mg})_{2-3}\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$), ambos apresentando a feição espectral a $1,9 \mu\text{m}$ não associadas e associadas a presença da água constitucional na faixa do infravermelho próximo, respectivamente.

Lindberg e Snyder (1972 apud Hunt et al., 1973) apresentaram vários espectros de reflectância difusa, nas faixas do visível e do infravermelho próximo, de vários minerais de

argila. Eles também apresentaram espectros de minerais de argila desidratados e rehidratados e concluem que pode existir correlação entre as feições dos espectros obtidos e as dos espectros de água molecular e que qualquer diferença entre esses espectros deve-se à água na estrutura de argila. Hunt et al. (1973) salientaram que muitas destas feições agudas são resultado de vibrações da hidroxila constitucional em vez de água molecular e podem-se notar facilmente estas diferenças pela presença da feição a 1,9 μm .

A feição a 1,9 μm envolve a vibração de dobramento da ligação H-O-H e, na ausência de água molecular, a feição é decorrente, quase na sua totalidade, do processo vibracional da hidroxila constitucional (Hunt et al., 1973), como ocorre na caulinita. A feição da água próxima a 1,9 μm só é fraca quando as bandas de absorção da hidroxila são muito mais intensas e quando resulta da água molecular absorvida (Hunt et al., 1973).

A figura 2 apresenta o espectro de reflectância difusa de uma amostra de caulinita, proveniente de Cripple Creek, Colorado, formada por aproximadamente 90% de caulinita, 5% de opacos e 5% de feldspato ou quartzo.

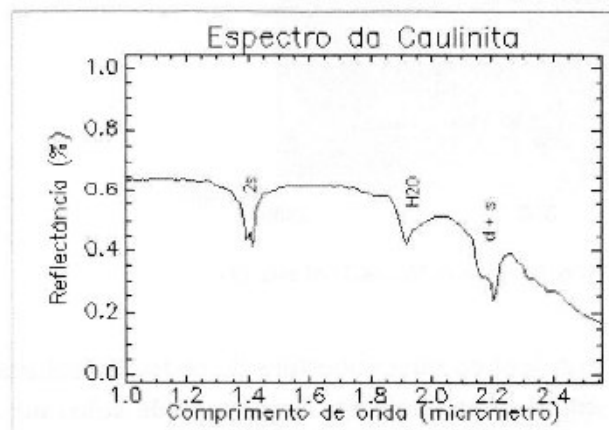


Figura 2 – Espectro de reflectância difusa de uma amostra de caulinita, intitulada KL502 da biblioteca espectral do USGS (Clark et al., 1993), proveniente de Cripple Creek, Colorado, apresentando as feições espectrais.

Solos que foram sujeitos a pronunciada alteração, como os latossolos situados em antigas superfícies de erosão, apresentam, em geral, elevados teores de gibbsita em sua composição. Em vários casos eles representam o mineral mais importante da fração argila (Baptista et al., 1998a).

Gibbsita é o um Al_2O_3 trihidratado, apresentado pela fórmula $(\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O})$, e é um dos componentes principais de depósitos de bauxita, formado por intemperismo tropical de rochas com silicato de alumínio. Raramente forma-se em regiões de baixas temperaturas. Junto com os outros dois minerais (diásporo e boehmita) que formam a bauxita, é um minério de alumínio (Hunt et al., 1971).

A gibbsita, assim como a caulinita, apresenta feições espectrais devido às vibrações das hidroxilas. No infravermelho próximo a gibbsita apresenta vibrações moleculares harmônicas (2s) próximas a 1,55 μm e combinações do tipo d + s próximas a 2,3 μm (Hunt et al., 1971). As bandas de absorção da água apresentam-se em 1,4 μm (2s) e em 1,9 μm (d + s). A figura 3 apresenta as feições características de uma amostra de gibbsita proveniente de Minas Gerais, Brasil.

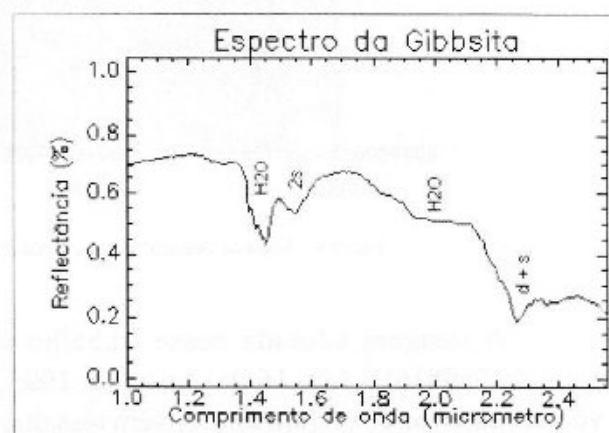


Figura 3 – Feições de absorção de uma amostra de gibbsita (WS214 da biblioteca do USGS - Clark et al., 1993) proveniente de Minas Gerais, Brasil.

3 - DESCRIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDOS

A área de estudos está inserida no município de São João D'Aliança, GO (Figura 4) e foi uma das áreas imageadas pelo sensor AVIRIS, em 1995, dentro da missão SCAR-B. Essa missão foi realizada graças ao convênio

entre a Agência Espacial Brasileira (AEB), Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) e *National Aeronautics and Space Administration* (NASA), no período de agosto a setembro de 1995, nos estados de Goiás, Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, Minas Gerais e Rondônia.

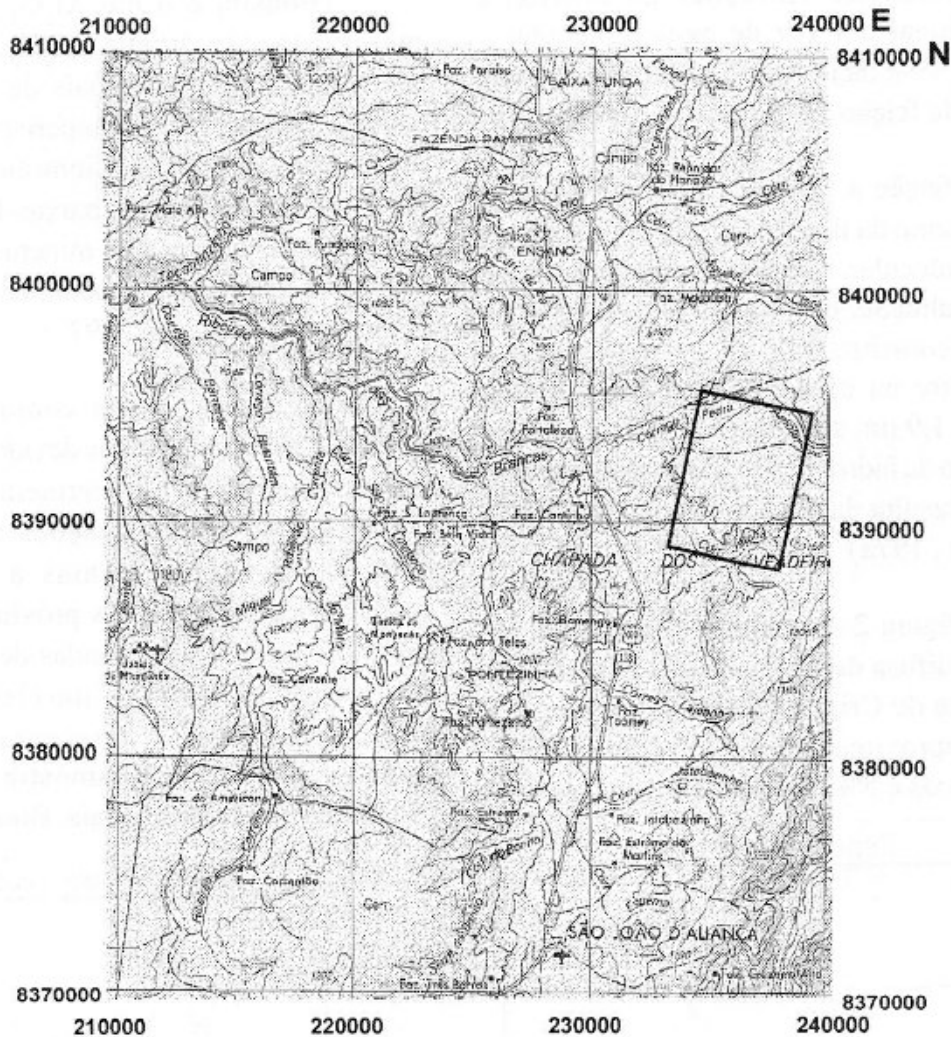


Figura 4 – Mapa de localização da subcena do AVIRIS no município de São João D'Aliança, GO.

A imagem adotada nesse trabalho é parte da 950816L2 (dia 16 de agosto de 1995, voo 02) subcena 03 (figura 5). Convém ressaltar que nesta época do ano os terrenos ainda não foram preparados para cultivo e ainda

apresentam uma cobertura de restos da cultura anterior que restringe a área útil de solos nus. Mesmo assim, a subcena apresenta uma área considerável de solos expostos para a realização desse trabalho.

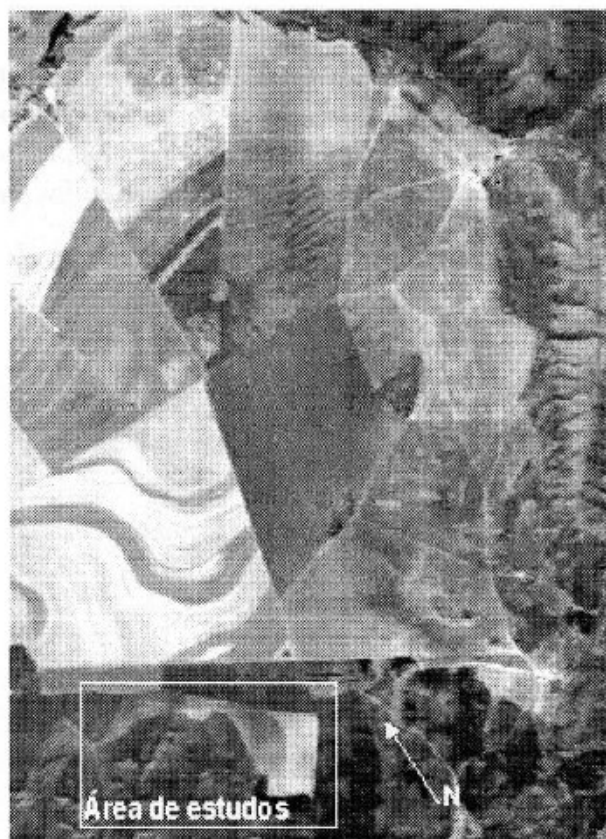


Figura 5 - Área de estudos

Um outro aspecto a ser analisado na escolha da área foi sua condição geomorfológica. Essa porção da imagem caracteriza-se geomorfologicamente como uma rampa suave ondulada com decaimento de NE para SW, e a variação espacial dos teores de argila tende a acompanhar a topografia neste caso, tendo em vista em que neste local o topo é composto por materiais pelíticos e a medida em que se desloca em direção às porções mais baixas encontram-se aflorados materiais psamíticos (quartzitos).

Baptista et al. (1998a) mostraram a coerência entre os espectros obtidos nos dados do AVIRIS e os obtidos no laboratório com amostras coletadas no campo, para caulinita e gibbsita, nesta mesma subcena.

4 - METODOLOGIA

A realização deste trabalho baseou-se nos seguintes passos metodológicos: correção atmosférica e redução dos dados de radiância para reflectância de superfície; convolução dos dados hiperespectrais para multiespectrais; coleta de amostras de solos no campo; determinação dos teores de argila em laboratório; obtenção de espectros de reflectância bi-direcional das amostras; convolução dos dados espectrais de laboratório em dados do sensor TM5.

4.1 - Correção atmosférica e redução dos dados de radiância para reflectância de superfície

Essa etapa foi realizada no INPE, em São José dos Campos, SP, utilizando o método descrito em Green et al. (1991). Esse método baseia-se em um procedimento de calibração dos dados utilizando-se parâmetros coletados no campo, no momento de sua aquisição, e um modelo de transferência radiativa (MODTRAN).

O método é constituído por quatro etapas (Robert O. Green, com. pessoal ao autor):

- ✓ desenvolvimento de tabelas (LUT - *look up tables*) de condições atmosféricas para a faixa imageada com o MODTRAN;
- ✓ convolução dos espectros gerados pelo MODTRAN para as características espectrais do AVIRIS;
- ✓ derivação das condições atmosféricas, principalmente vapor d'água, a partir dos espectros do AVIRIS e das tabelas do MODTRAN;

- ✓ inversão dos espectros de radiância calibrada do AVIRIS para reflectância espectral aparente da superfície.

De acordo com Clark *et al.* (1995) essa correção realiza um ajuste nos níveis de oxigênio, dióxido de carbono e vapor d'água para cada

pixel. Como resultado, esse método elimina as bandas de absorção da água em 1,4 e 1,9 μm , além de reduzir os dados de radiância para reflectância, conforme pode-se notar nos espectros apresentados na figura 6, obtidos para o mesmo pixel.

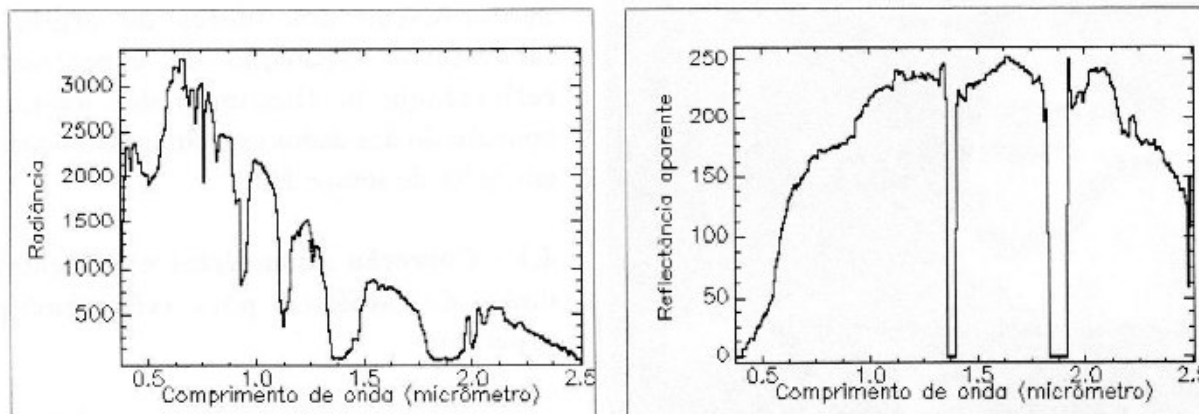


Figura 6 - Espectro obtidos a partir dos dados do AVIRIS. a) Radiância ($\mu\text{W}/\text{cm}^2/\text{nm}/\text{sr}$). b) Reflectância aparente obtida pelo Método de Green *et al.* (1991), mostrando a remoção das bandas de absorção da água em 1,4 e 1,9 μm .

Um dos principais problemas do método é o tempo de computação, cerca de 50 vezes superior a de outros modelos, além de forçar as primeiras bandas a zero, conforme salientam Baptista *et al.* (1998), o que de certa forma, compromete a determinação do cálculo de cores, por meio dos espectros.

Mesmo assim, esse modelo é considerado um dos melhores procedimentos para correção atmosférica e derivação da reflectância a partir dos dados do AVIRIS.

4.2 - Convolução dos dados hiperespectrais para multiespectrais

Uma das vantagens dos sensores hiperespectrais é a possibilidade de simular sistemas sensores multiespectrais existentes, testar sistemas que ainda não foram implementados, ou ainda propor novas bandas

para sistemas futuros. Para tal é necessário utilizar-se de um procedimento matemático chamado convolução que baseia-se no algoritmo apresentado na equação 1, no qual, para cada banda simulada i , a radiância $L(i)$ é o somatório do produto dos pesos das funções de resposta espectral ($\sum wSRF(c)$) multiplicado pela radiância medida pelo AVIRIS $L(c)$, em cada um dos 224 canais (Green & Shimada, 1997):

$$L(i) = \sum wSRF(c) \cdot L(c) \quad (1)$$

O sensor simulado neste trabalho foi o ASTER (*Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*) que é fruto do esforço de cooperação entre a NASA e o Ministério de Comércio Internacional e Indústria do Japão e colocado em órbita em meados de 1998. Sua plataforma orbital é o EOS AM-1 do programa *Earth Observing System* (EOS/NASA). O sistema sensor é composto por três

subsistemas separados (VNIR – visível e infravermelho próximo; SWIR – infravermelho de ondas curtas; TIR – infravermelho termal), descritos na tabela 1 (ASTERWEB, 1998).

Tabela 1 – Descrição dos subsistemas sensores componentes do ASTER

Características do Sensor	VNIR – visível e infravermelho próximo	SWIR – infravermelho de ondas curtas	TIR – infravermelho termal
Faixa espectral	Banda 1: 0,52 – 0,60 μm Banda 2: 0,63 – 0,69 μm Banda 3: 0,76 – 0,86 μm Banda 3B*: 0,76 – 0,86 μm	Banda 4: 1,600 – 1,700 μm Banda 5: 2,145 – 2,185 μm Banda 6: 2,185 – 2,225 μm Banda 7: 2,235 – 2,285 μm Banda 8: 2,295 – 2,365 μm Banda 9: 2,360 – 2,430 μm	Banda 10: 8,125 – 8,475 μm Banda 11: 8,475 – 8,825 μm Banda 12: 8,925 – 9,275 μm Banda 13: 10,25 – 10,95 μm Banda 14: 10,95 – 11,65 μm
Resolução espacial	15 m	30 m	90 m
Taxa de transferência de dados (Mbits/sec)	62	23	4.2
Largura da faixa imageada (km)	60	60	60
Tipo de detetor	Si	PtSi-Si	HgCdTe
Quantificação dos dados (bits)	8	8	12

*Backward looking – Mesma faixa espectral da banda 3 porém, com visada para trás possibilitando a obtenção de visão estereoscópica dos dados.

A figura 7 apresenta as dez bandas do ASTER e as funções de resposta espectrais que correspondem às posições dos canais espectrais do AVIRIS. Os símbolos mostram valores dos pesos das funções em cada canal do AVIRIS.

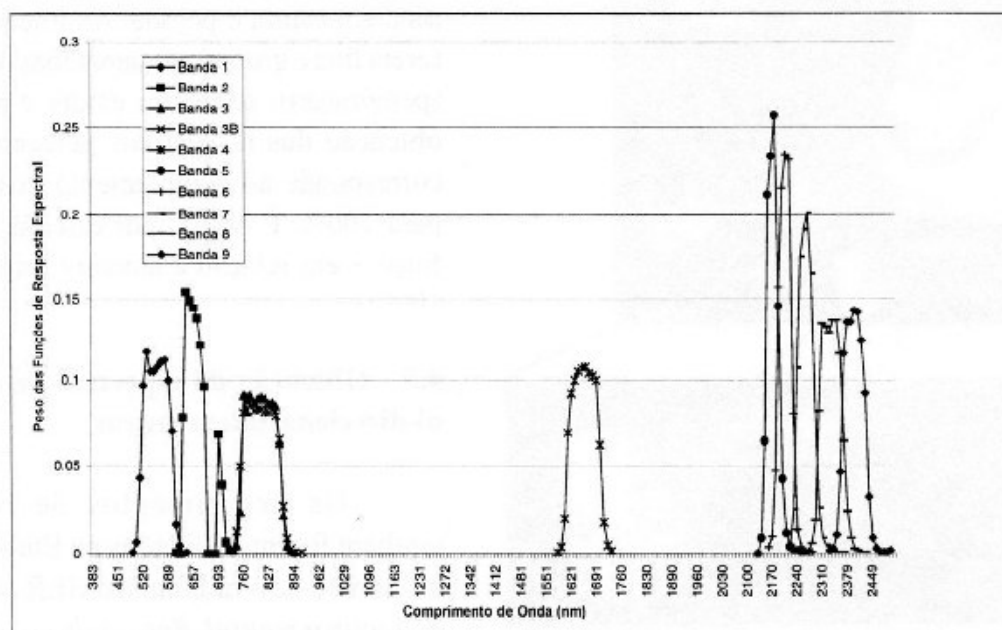


Figura 7 – Peso das funções de resposta espectral utilizadas no algoritmo de convolução para simulação de dados ASTER a partir dos dados obtidos pelo AVIRIS.

4.3 - Coleta de amostras de solos no campo

A etapa de campo foi conduzida visando amostrar as principais unidades de solos. Durante o período de obtenção de dados hiperespectrais por meio do AVIRIS no Brasil, a maioria da superfície de solos encontrava-se recoberta por resíduos de cultura, o que limitou as áreas de solos expostos em duas: uma representada por uma superfície plana com declividade inferior a 3% predominantemente coberta com Latossolo Vermelho-Escuro argiloso (pontos 1 e 2 da figura 8); a outra área caracterizada por um relevo plano a suave ondulado com declives inferiores a 8% composta por uma cobertura de Latossolo Vermelho-Escuro muito argiloso (ponto 7), Latossolo Vermelho-Amarelo (ponto 6), Cambissolo (ponto 4) e Areia Quartzosa (ponto 3).

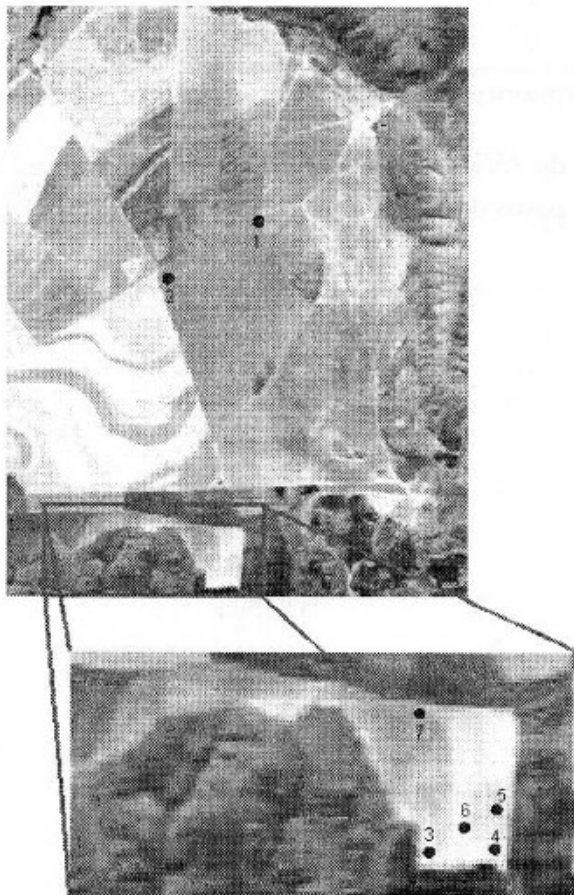


Figura 8 – Localização dos pontos amostrados no campo. Adaptado de Baptista et al. (1998a)

Para análise laboratorial de granulometria e obtenção de espectros, foram utilizados todos os pontos apresentados na figura 8. Porém, para a análise da imagem foram utilizados os pontos 3 a 7, tendo em vista que esta porção da imagem é a que realmente apresenta variação textural significativa (a textura designa a proporção relativa das frações areia, silte e argila do solo) e a grande mancha na qual foram coletados os pontos 1 e 2 apresenta apenas uma classe de teor de argila, entre 35 a 65%.

4.4 - Determinação da granulometria em laboratório

Essa etapa foi realizada na Embrapa/CPAC (Centro de Pesquisa Agropecuária dos Cerrados), no Laboratório de Física de Solos, utilizando-se o método da pipeta que se baseia na velocidade de queda das partículas que compõem o solo. Fixa-se o tempo para o deslocamento vertical na suspensão do solo com água, após a adição de um dispersante químico (soda ou calgon). Pipeta-se um volume da suspensão, para a determinação da argila que seca em estufa é pesada. As frações grosseiras (areia fina e grossa) são separadas por tamisação (peneiração), secas em estufa e pesadas para obtenção dos respectivos percentuais. O silte corresponde ao complemento dos percentuais para 100%. É obtido por diferença das outras frações em relação à amostra original (CNPS, 1997).

4.5 - Obtenção de espectros de reflectância bi-direcional das amostras

Os experimentos de radiometria também foram realizados na Embrapa/CPAC, utilizando-se o radiômetro GER (*Geophysical & Environmental Research Corp.*), modelo MARK V. Este instrumento obtém espectros

de reflectância cobrindo a região espectral de 0,3 a 2,5 μm , com resolução de 2 nm na região de 0,3 μm a 1,0 μm e de 4 nm na faixa de 1,0 a 2,5 μm .

4.6 - Convolução dos dados espectrais de laboratório em dados do sensor TM5

Este procedimento foi adotado para testar a metodologia proposta por Madeira Netto (1993) desenvolvida para a determinação quantitativa de um índice proporcional à textura dos solos tropicais para os dados do sensor TM5 do Landsat, de acordo com a equação 2:

$$IT_x(STM) = \frac{STM5 - STM7}{STM5 + STM7} \quad 2)$$

Onde $IT_x(STM)$ é um índice proporcional à textura dos solos; $STM5$ corresponde à banda 5 simulada por meio de convolução dos espectros obtidos em

laboratório; e $STM7$, a banda 7 simulada. A análise de regressão linear de 52 amostras mostrou uma correlação significativa entre o índice $IT_x(STM)$ e o teor de argila, com um coeficiente de correlação $r = 0,80$.

Esse procedimento de convolução é o mesmo descrito no item sobre convolução dos dados hiperespectrais para multiespectrais, porém foi adotado sobre os espectros obtidos em laboratórios e não sobre imagens como no item descrito anteriormente.

5 - RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os espectros obtidos para as amostras em laboratório e convolucionados para TM5 foram tratados, utilizando-se a equação (2) de Madeira Netto (1993) e posteriormente os dados de $IT_x(STM)$ foram correlacionados com os teores de argila das mesmas amostras, conforme pode ser observado na figura 9.

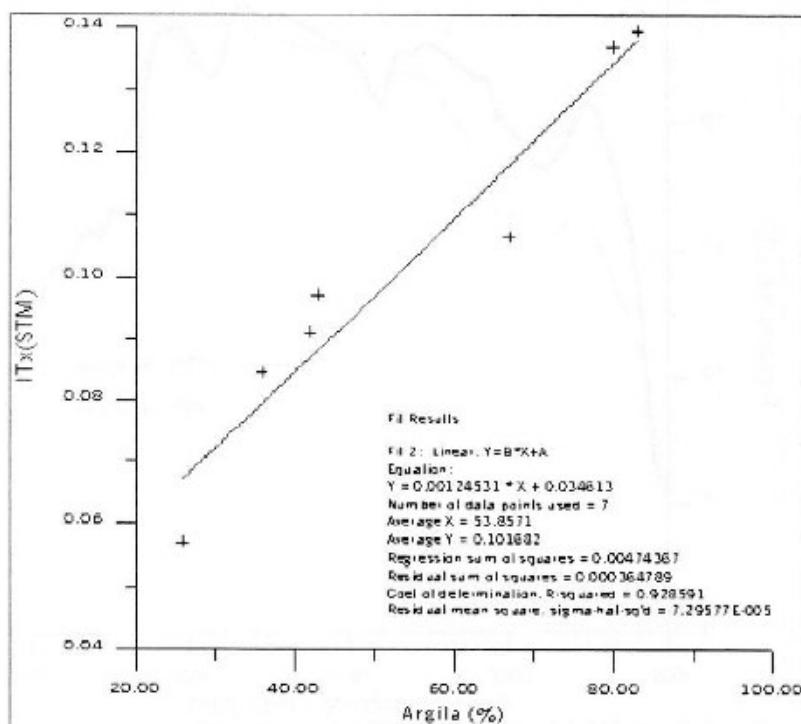


Figura 9 – Correlação entre os teores de argila (%) com o índice $IT_x(STM)$ para cada ponto amostrado no campo.

Conforme pode-se notar, os teores de argila são altamente correlacionáveis com o índice proporcional à textura proposto por Madeira Netto (1993) e pode-se notar que os espectros realmente apresentam diferenças quando obtidos sob amostras pelíticas e psamíticas (Figura 10). A diferença é notada quando se analisa a inclinação do espectro de reflectância da porção onde não existem indícios de minerais de argila, entre 1,55 a 1,75 μm , até a porção que apresenta feições dos argilominerais, na faixa a partir de 2,0 μm . Os espectros de amostras de solos com baixos teores de argila apresentam uma inclinação baixa enquanto que os de solos com elevados teores, uma inclinação alta, conforme pode ser notado na figura 10.

Os dados hiperespectrais do sensor AVIRIS foram corrigidos para os efeitos atmosféricos e reduzidos de radiância para

reflectância. Adotou-se uma nova razão de bandas baseando-se nas bandas de absorção dos dois minerais mais abundantes da fração argila, a caulinita e a gibbsita; e do ponto de máxima reflectância das amostras coletadas no intervalo de 1,55 a 1,75 μm , a 1,658 μm . A formulação proposta para a espacialização dos teores de argila por meio dos dados AVIRIS é apresentada na equação 3.

$$I_{Text} = \frac{(B_2 + B_3) - B_1}{B_1} \quad (3)$$

Onde I_{Text} corresponde a um índice proporcional aos teores de argila dos solos; B_1 a banda correspondente ao ponto de máxima reflectância, a 1,658 μm ; B_2 a banda de absorção da caulinita, a 2,196 μm (adequado para AVIRIS); B_3 a banda de absorção da gibbsita, a 2,266 μm (adequado para AVIRIS).

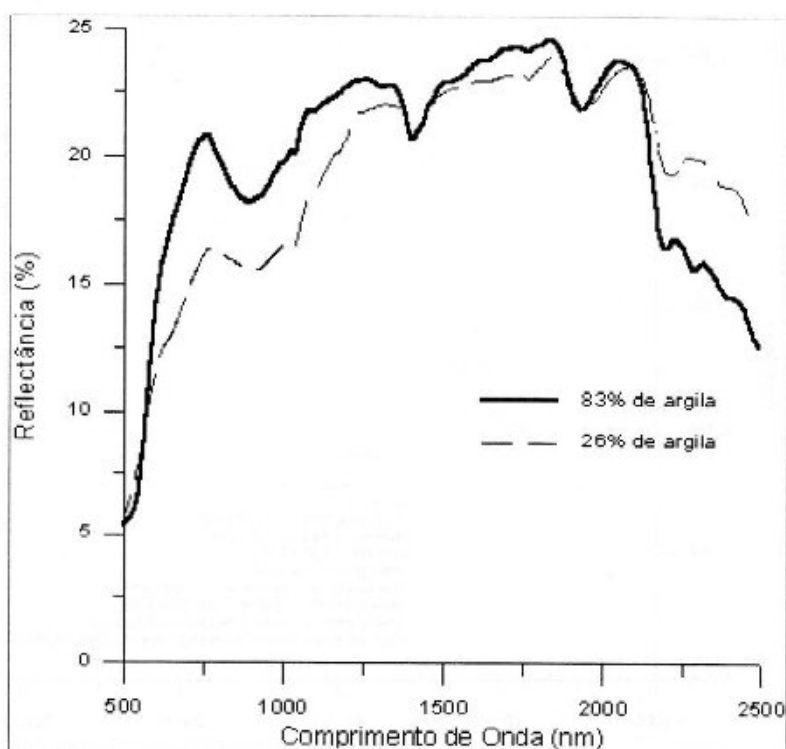


Figura 10 – Comparação entre os espectros de pontos amostrados no campo com diferentes teores de argila.

Após a adoção do índice espectral IText, exposto na equação 3, extraiu-se da imagem os valores para cada ponto amostrado no campo e realizou-se regressão linear entre IText (variável dependente) e a porcentagem de argila (variável independente), obtendo-se um alto coeficiente de correlação, $r = 0,94$.

Esse procedimento estatístico foi utilizado visando organizar o resultado obtido pelo índice IText em classes de porcentagem de textura. O resultado pode ser visualizado na figura 11.

A espacialização reflete a variação textural que ocorre no campo. Nos locais que

apresentam mais baixos valores de porcentagem de argila, ocorrem areias quartzosas cujos materiais de origem são psamíticos e estas áreas são as mais baixas topograficamente, nas quais os processos erosivos expuseram uma camada de quartzitos. As áreas correspondentes às duas últimas classes são latossolos de textura argilosa e muito argilosa, provavelmente originados de metassiltitos argilosos, mas não se encontrou nenhum material de origem exposto.

Convém ressaltar que a variação textural de solos não ocorre como evento discreto no espaço e portanto pode-se perceber a variação gradual e lógica dos teores de argila.

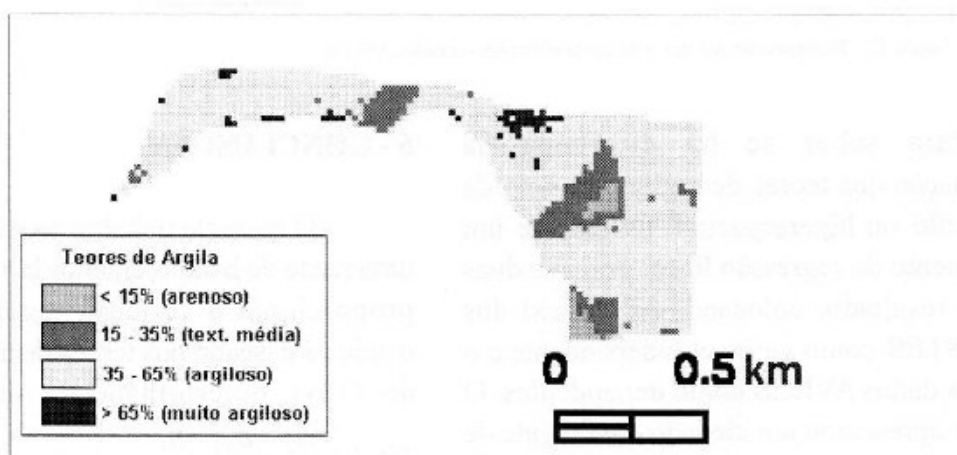


Figura 11 – Mapeamento dos teores de argila utilizando-se dados AVIRIS.

Utilizou-se ainda os dados AVIRIS convolucionados para ASTER para analisar se a eficiência do mapeamento em dados multiespectrais é tão alta como nos dados hiperespectrais. Para tal adotou-se a razão de bandas apresentada na equação 3 utilizando-se bandas mais largas porém com o mesmo princípio, ou seja, as bandas que apresentam as absorções da caulinita e da gibbsita e que apresentam o ponto de máxima reflectância no intervalo de 1,55 a 1,75 μm . Utilizou-se na formulação a banda 4 (1,60 a 1,70 μm), a banda

6 (2,185 a 2,225 μm) e a banda 7 (2,235 a 2,285 μm).

Após a realização da razão de bandas realizou-se nova regressão linear entre IText como variável dependente e a porcentagem de argila (variável independente), obtendo-se um coeficiente de correlação, $r = 0,92$.

O procedimento estatístico de regressão linear foi novamente utilizado para organizar o resultado em classes de porcentagem de textura.

O resultado pode ser visualizado na figura 12. Percebe-se que o resultado é bastante coerente e altamente correlacionável com o IText derivado dos dados AVIRIS. Apresentam as

variações graduais anteriormente citadas e mostram as mesmas tendências apresentadas na figura 11.

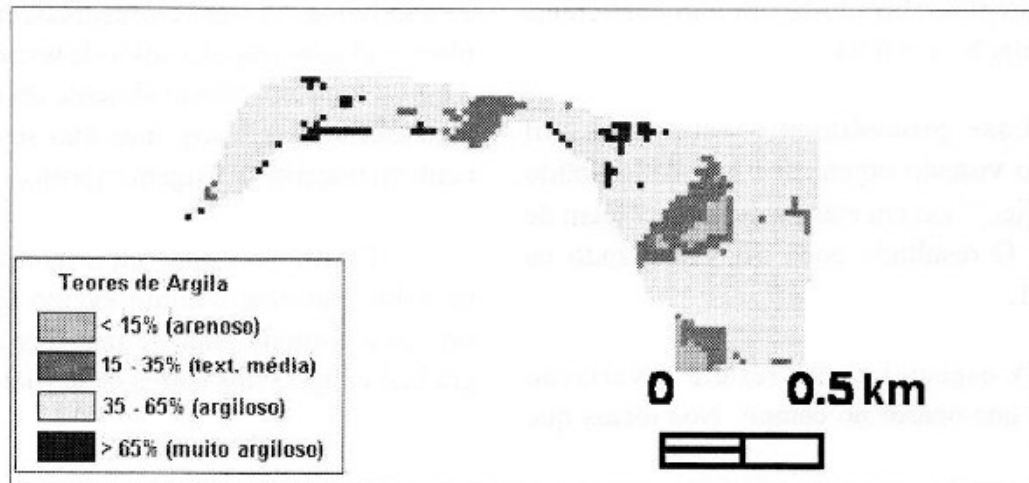


Figura 12 – Mapeamento dos teores de argila utilizando-se dados ASTER.

Para saber se há diferença na determinação dos teores de argila por meio de dados multi ou hiperespectral, utilizou-se um procedimento de regressão linear entre as duas imagens resultado, colocando-se o IText dos dados ASTER como variável independente e o IText dos dados AVIRIS como dependentes. O resultado apresentou um elevado coeficiente de correlação, $r = 0,99$.

Pode-se afirmar que a utilização de sensores multiespectrais, tais como Landsat TM5 (Madeira Netto, 1993) e ASTER, e de sensores hiperespectrais como AVIRIS, para o mapeamento de teores de argila de solos expostos, é bastante eficiente, sendo que os dados com bandas mais estreitas (AVIRIS) permitem resultados um pouco mais precisos, pois apresentam menos influência de misturas espectrais de outros elementos componentes da cena.

6 - CONCLUSÕES

O presente trabalho permitiu determinar uma razão de bandas entendida como um índice proporcional à variação textural dos solos tropicais baseado nos teores de argila, chamado do IText, determinado da seguinte forma

$$IText = \frac{(B_2 + B_3) - B_1}{B_1}, \text{ onde } B_1 \text{ representa a banda}$$

correspondente ao ponto de máxima reflectância no intervalo entre 1,55 a 1,75 μm ; B_2 a banda de absorção da caulinita; e B_3 como a banda de absorção da gibbsita.

Convém ressaltar que deve-se adequar a razão de acordo com os dados disponíveis e isso foi realizado para os dados convolucionados para o sensor ASTER, visando também testar a metodologia para dados multiespectrais. Os resultados obtidos provam que a metodologia pode ser empregada tanto para dados multiespectrais como para os hiperespectrais,

ênfatizando que os dados obtidos com bandas espectrais mais estreitas são um pouco mais precisos do que os com bandas mais largas, devido a influência de misturas espectrais de outros elementos componentes da cena.

Finalmente, é importante salientar que todo e qualquer trabalho envolvendo dados de sensoriamento remoto podem dar um rumo, mas as quantificações necessitam de trabalhos de campo para que os parâmetros obtidos pela modelagem das imagens possam ser correlacionadas com os obtidos *in situ*.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASTERWEB. Site do ASTER na Internet (<http://asterweb.jpl.nasa.gov/asterhome/>), 1998.
- BAPTISTA, G.M.M.; MARTINS, E.S.; MADEIRA NETTO, J.S.; CARVALHO Jr., O.A.; MENESES, P.R. Use of AVIRIS Data for Mineralogical Mapping in Tropical Soils, in the District of São João D'Aliança, Goiás. In: NASA/JPL, Seventh Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer (AVIRIS) Workshop, *Summaries*, 1:33-42, 1998a.
- BAPTISTA, G.M.M.; MADEIRA NETTO, J.S.; MENESES, P.R. Determinação da Relação Sílica - Alumina a partir dos Dados do Sensor AVIRIS (JPL/NASA), para Discretização Espacial do Grau de Intemperismo de Solos Tropicais. In: INPE, IX Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, *Anais em CD-ROM*, 1998b.
- CLARK, R.N.; SWAYZE, G.A.; GALLAGHER, A.; KING, T.V.V.; CALVIN, W.M. The U.S. Geological Survey Digital Spectral Library: Version 1: 0.2 to 3.0 μm . *U.S.G.S. Open File Report 93-592*, 1340 pp, 1993.
- CLARK, R.N.; SWAYZE, G.A.; HEIDEBRECHT, K.; GREEN, R.O.; GOETZ, A.F.H. Calibration to Surface Reflectance of Terrestrial Imaging Spectrometry Data: Comparison of methods. In: NASA/JPL, Fifth Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer (AVIRIS) Workshop, *Summaries*, 1:41-42, 1995.
- CNPS. *Manual de Métodos de Análise de Solo*. 2.ed. Rio de Janeiro, EMBRAPA, 212p, 1997.
- GREEN, R.O. & SHIMADA, M. On-orbit calibration of a multispectral satellite sensor using a high altitude airborne imaging spectrometer. *Adv. Space Res.*, 19:1387-1398, 1997.
- GREEN, R.O.; CONEL, J.E.; MARGOLIS, J.S.; BRUGGE, C.J.; HOOVER, G.L. An Inversion Algorithm for Retrieval of Atmospheric and Leaf Water Absorption from AVIRIS Radiance with Compensation for Atmospheric Scattering. In: NASA/JPL, Third Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer (AVIRIS) Workshop, *Proceedings*, 1:51-61, 1991.
- HLAVAY, H.; JONAS, K.; ELEK, S.; INCZEDY, J. Characterization of the Particle Size and Crystallinity of Certain Minerals by Infrared Spectrophotometry and Other Instrumental Methods – I. Investigations on clay minerals. *Clays and Clay Minerals*, 25:451-456, 1977.
- HUNT, G.R.; SALISBURY, J.W. Visible and near infrared spectra of minerals and rocks. I. Silicate minerals. *Modern Geology*. 1:283-300, 1970.

HUNT, G.R.; SALISBURY, J.W.; LENHOFF, C.J. Visible and Near-Infrared Spectra of Minerals and Rocks: III. Oxides and hydroxides. *Modern Geology*, 2:195-205, 1971.

HUNT, G.R.; SALISBURY, J.W.; LENHOFF, C.J. Visible and near-infrared spectra of minerals and rocks: VI. Additional silicates. *Modern Geology*. 4:85-106, 1973.

MADEIRA NETTO, J. S. *Étude Quantitative des Relations Constituants Minéralogiques – Réflectance Diffuse des Latosols Brésiliens: Application à l'utilisation pédologique des données satellitaires TM (Région de Brasilia)*. 1 ed. Paris, Éditions de l'ORSTOM, 236p, 1993.

MADEIRA NETTO, J. S.; BÉDIDI, A.; CERVELLE, B.; FLAY, N. Spectral (MIR) Determination of Kaolinite and Gibbsite Contents in Lateritic Soils. *C. R. Acad. Sci. Paris*, t. 321, série II a, 119-128 pp, 1995.

MADEIRA NETTO, J. S.; BÉDIDI, A.; CERVELLE, B.; POUGET, M.; FLAY, N. Visible Spectrometric Indices of Hematite (Hm) and Goethite (Gt) Content in Lateritic Soils: the application of a Thematic Mapper (TM) image for soil-mapping in Brasilia, Brazil. *Int. J. Remote Sensing*, 18:2835 – 2852, 1997.