

## **Estudo de assinaturas espectrais de metavulcânicas do Espinhaço Setentrional e sua aplicação no mapeamento mineral em imagem do sensor ASTER: dados da Biblioteca Espectral do Serviço Geológico do Brasil**

Mônica Mazzini Perrotta<sup>1</sup>  
Ana Paula Justo<sup>1</sup>  
Carlos Roberto de Souza Filho<sup>2</sup>  
Juliano Alves de Senna<sup>2</sup>  
Tales Américo Spínola de Almeida<sup>1</sup>  
Sergio Azevedo Marques de Oliveira<sup>1</sup>

<sup>1</sup> CPRM – Serviço Geológico do Brasil – Divisão de Sensoriamento Remoto - DISERE  
Rua Costa, 55 - São Paulo - 01304-010 - SP, Brasil  
{monica.perrotta, ana.justo, tales.almeida, sergio.azevedo}@cprm.gov.br

<sup>2</sup> Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP - Instituto de Geociências (IG)  
Caixa Postal 6152 – 13083-970 – Campinas – SP, Brasil  
{beto, jsenna}@ige.unicamp.br

**Abstract.** A set of spectral signatures of the Northern Espinhaço Supergroup (NES) metavolcanic rocks were acquired and assigned to the newly built Geological Survey of Brazil (GSB) Spectral Library. This database comprises VNIR-SWIR (350 to 2500 nm) spectra of fresh and altered rock samples measured with an ASD FieldSpec-3 High-Resolution spectroradiometer. The identification of minerals in mixed spectra was performed using the SIMIS Feature Search© software which allows discrimination of mineral phases by comparing the absorption features of unknown minerals with similar features of minerals listed in a reference spectral library. Whereas spectral signatures related to compositional variations in fresh rocks proved difficult to distinguish, in altered samples it was possible to identify a number of individual minerals and assemblages, including sericite/muscovite, illite, kaolinite, montmorillonite, goethite, hematite, dickite or pyrophyllite, calcite, chlorite and barite. These mineral assemblages are consistent with epithermal hydrothermal alteration previously described assemblages in NES altered volcanics. Atmospherically-compensated ASTER's multispectral data were used to map the distribution of hydrothermal alteration minerals based on endmembers selected from the NES spectral library. Spectral Angle Mapper (SAM) and Mixture Tuned Matched Filtering (MTMF) were the algorithms employed for the task. Both mapping methods were able to recognize pixels in the imagery similar to the endmembers. Reference spectra and spectra extracted from ASTER imagery pixels also proved to match at equivalent sites in the field, particularly in the SAM-derived maps. These results strengthen the potential use of the GSB Spectral Library of rocks to assist in geologic mapping and mineral exploration campaigns.

**Palavras-chave:** reflectance spectroscopy, remote sensing, spectral mapping, geology, ASTER, espectroscopia de reflectância, sensoriamento remoto, mapeamento espectral, geologia, sensor ASTER.

### **1. Introdução**

As assinaturas espectrais analisadas neste estudo são respostas espectrais de rochas medidas em valores de reflectância no espectrorradiômetro *ASD-FieldSpec-3 Hi-Resolution* dentro da faixa de comprimentos de onda do visível ao infravermelho de ondas curtas (350 e 2500 nm). Estes dados constam da Biblioteca Espectral do Serviço Geológico do Brasil (SGB), base de dados que contempla amostras de rochas frescas e alteradas selecionadas nas litotecas do SGB a partir dos registros das bases de afloramentos, litoestratigrafia, petrografia e geoquímica do GEOBANK, banco de dados geocientíficos do SGB.

O principal objetivo deste trabalho foi avaliar o potencial de utilização dos dados registrados na Biblioteca Espectral do SGB em investigações geológicas e de exploração mineral. Para isto foi selecionado um conjunto de assinaturas referentes a 124 amostras de rochas de filiação vulcânica ácida a intermediária da Formação Novo Horizonte (FNH), base do Grupo Rio dos Remédios do Supergrupo Espinhaço Setentrional, coletadas no Projeto

Ibitiara - Rio de Contas (Guimarães et al. 2005), considerando-se a potencialidade metalogenética, principalmente aurífera, desta unidade.

Na Figura 1 apresenta-se o mapa geológico simplificado da região da Chapada Diamantina Ocidental com indicação da ambiência deposicional das unidades litoestratigráficas envolvidas, segundo concepção de Guimarães et al. (2005). As litofácies vulcânica, subvulcânica, piroclástica e epiclástica englobadas na FNH são interpretadas por estes autores como depositadas no Estateriano, em ambiente tectônico de fase sin-rifte durante a evolução da Bacia Espinhaço Oriental. São rochas de composição dacítica, riolítica e mais raramente andesítica representativas de extensivo vulcanismo ácido gerado por fusão de fontes crustais no estágio inicial do rifteamento. Este pacote vulcânico/subvulcânico apresenta-se afetado por alteração hidrotermal descrita com base em dados de campo, petrográficos, e de análise de inclusões fluidas como decorrente de reações de devolatilização da pilha vulcanossedimentar associada a processos de espessamento crustal na fase de inversão do rifte, sob temperaturas de homogeneização inferiores a 300°C. A circulação de fluidos carreando metais lixiviados e sua deposição tardia em zonas de dilatação foi facilitada por planos gerados na deformação e desenvolveu zonas de potassificação, propilitização, greisenização, argilização e silicificação. Uma deformação associada a metamorfismo de baixo grau também causa sericitização dos litotipos.

As rochas frescas tem coloração cinza esverdeada ou rosada, passando a tonalidades arroxeadas, esverdeadas ou rosadas quando afetadas por alteração hidrotermal e assumindo cor amarela, laranja ou branca por alteração superficial. Em amostras selecionadas do conjunto estudado análises de difração de raios-X identificaram na fração argila a presença de illita e/ou caulinita eventualmente acompanhadas por goetita ou gibsitita.

Para a realização deste ensaio de aplicação duas abordagens foram desenvolvidas, a interpretação espectro-mineralógica das curvas espectrais e o mapeamento espectral processado em dados do sensor ASTER (*Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*) submetidos à compensação atmosférica, com base em assinaturas espectrais medidas em laboratório selecionadas como amostras de referência.

## **2. Métodos de Trabalho**

### **2.1 Método de Análise Espectral e Recuperação dos Dados no GEOBANK**

As análises espectrais foram realizadas no espectrorradiômetro *ASD-FieldSpec-3 Hi-Resolution* que tem alcance espectral do visível ao infravermelho de ondas curtas, no intervalo de 350 a 2500 nm e resolução espectral de 3 nm (em 700nm), 8,5 nm (em 1400nm) e 6,5 nm (em 2500nm) num total de 2101 bandas. As medidas, registradas em valores de reflectância proporcional relativa a uma referência padrão branca de máxima reflectância difusa (do tipo *Spectralon*), foram feitas por meio de sonda de contato. Cada amostra foi submetida a várias análises, numa média de 3, procurando-se medir uma assinatura espectral para cada diferente categoria de face conforme a variação do tipo (exposta, quebra natural ou serrada), grau de intemperismo, cor, relação angular com a foliação ou bandamento principal e relação matriz-megacristais, quando for o caso. Estas informações estão registradas na base de dados. Cada amostra é fotografada e de cada uma é conservada uma alíquota de prova. Todos os dados disponíveis no GEOBANK referentes às amostras, tais como localização geográfica, características mesoscópicas, análises petrográficas, além das análises espectrais, tanto em arquivo texto como na forma de gráfico, o registro fotográfico e ainda resultados de análises complementares semiquantitativas de difratometria de raios-X, podem ser recuperados num relatório gerado interativamente no aplicativo da base de dados Biblioteca Espectral.

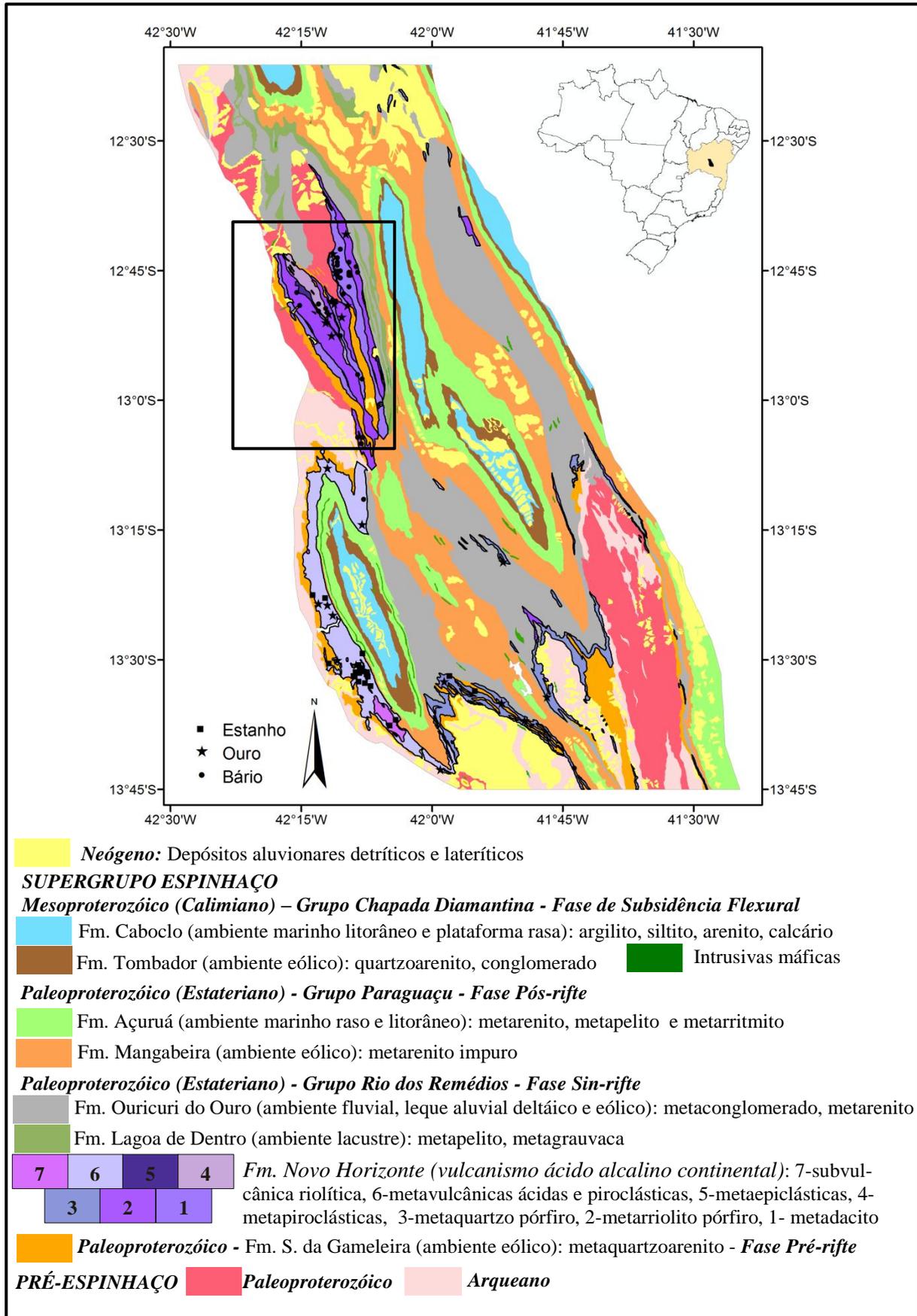


Figura 1. Mapa geológico da Chapada Diamantina Ocidental (simplificado de Guimarães et al., 2005). O retângulo contornado em preto indica a área da imagem do sensor ASTER.

## 2.3 Interpretação Mineralógica das Assinaturas Espectrais e Seleção de Membros Finais para Mapeamento Espectral Aplicado em Imagens de Sensor Óptico

A interpretação mineralógica das assinaturas espectrais foi feita principalmente por meio do programa *SIMIS Feature Search*<sup>®</sup> que permite a discriminação das fases minerais presentes por comparação das feições de absorção no espectro analisado com feições similares de minerais de uma biblioteca espectral de referência. Neste estudo a biblioteca de referência utilizada foi a do USGS (*United States Geological Survey*) (Clark et al., 2007). Identificados os minerais presentes uma desmistura das fases é calculada, resultando na proporção estimada de cada mineral, e uma curva espectral hipotética é gerada graficamente para comparação com o espectro analisado. Se por um lado o programa *SIMIS Feature Search*<sup>®</sup> é eficiente na identificação das fases minerais, por outro não há possibilidade de ajustes na proporção das fases identificadas (apenas duas proporções possíveis podem ser obtidas variando-se o método de desmistura, ou por cálculo linear com base em mínimos quadrados, ou com base na profundidade das feições), assim alternativamente a ferramenta de operações entre espectros do programa *ENVI*<sup>®</sup> pode ser utilizada para este ajuste.

Na região do espectro eletromagnético medida o comportamento espectral de minerais está associado a fenômenos de transições eletrônicas ou vibracionais resultantes da interação da energia eletromagnética com átomos e moléculas. Nela são passíveis de identificação as feições de absorção diagnósticas dos seguintes grupos minerais: óxidos de ferro, silicatos hidroxilados com ferro, sulfatos e carbonatos de ferro, piroxênios, óxidos e carbonatos de cobre, carbonatos e silicatos de manganês (na região do visível e infravermelho próximo) e filossilicatos, silicatos hidroxilados, sulfatos, carbonatos e minerais com molécula de amônia na composição (na região do infravermelho de ondas curtas).

Após a interpretação de aproximadamente 320 espectros, alguns destes, os mais representativos das fases minerais típicas de assembleias de alteração hidrotermal, foram selecionados para constituírem uma biblioteca de membros finais de referência para mapeamento espectral aplicado em imagens de sensores ópticos.

## 2.4 Mapeamento Espectral em Imagem do Sensor ASTER

Utilizou-se duas cenas contíguas do sensor ASTER, com data de passagem em 01/09/2001, que recobrem parte da área estudada. Dado o intervalo espectral amostrado em laboratório, foram selecionadas suas três bandas do visível e infravermelho próximo (VNIR), centradas respectivamente em 556, 661 e 807 nanômetros e com resolução espacial de 15 m, e suas seis bandas do infravermelho de ondas curtas (SWIR), centradas respectivamente em 1650, 2167, 2209, 2262, 2336 e 2400 nm e com resolução espacial de 30 m.

O pré-processamento das imagens ASTER envolveu os seguintes procedimentos: (i) correção do efeito de *cross-talk*, através do programa CRSTK30 (ERSDAC, 2006); (ii) ortorretificação das cenas, utilizando-se o modelo digital de terreno extraído diretamente das bandas 3N e 3B; (iii) agrupamento das bandas do espectro refletido num único arquivo, com reamostragem dos pixels das bandas do SWIR por método do vizinho mais próximo para a resolução de 15 m, compatível com a resolução das bandas do VNIR; (iv) mosaico das duas cenas e recorte na área de interesse (Figura 1); (v) compensação atmosférica dos dados, por modelo de transferência radiativa MODTRAN (*Moderate spectral resolution atmospheric transmittance algorithm*), complementando-se os parâmetros atmosféricos com dados de cena de mesma passagem do sensor MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*), o que eleva a acurácia da correção e transforma os dados em valores de reflectância aparente.

Dois algoritmos de classificação espectral foram empregados, o *Spectral Angle Mapper* (SAM) e o *Mixture Tuned Matched Filtering* (MTMF), ambos determinam a similaridade das

assinaturas espectrais dos pixels da imagem com os espectros de referência, mas para isso os espectros medidos em laboratório devem ser reamostrados para a resolução espectral do sensor. O método SAM (Kruze et al., 1993) calcula o ângulo (em radianos) entre o espectro do pixel e o espectro de referência tratando-os como vetores num espaço cuja dimensionalidade é igual ao número de bandas. Quanto menor o ângulo calculado mais semelhantes são os espectros. No método MTMF (Boardman et al., 1995) encontra-se nos pixels da imagem as abundâncias dos espectros de referência utilizando-se de uma aproximação de desmistura parcial através de um filtro de coincidência que maximiza a resposta dos espectros de referência conhecidos, ao mesmo tempo em que tende a eliminar a contribuição de um background desconhecido. Produz assim um grupo de bandas, cada uma relativa a um espectro de referência, cujos pixels têm valores numéricos (*score*) que os categorizam conforme maior ou menor coincidência com cada um dos membros finais. Um segundo grupo de bandas traz um valor de improbabilidade baseado em misturas possíveis entre o background composto e o espectro de referência. Para seleção dos pixels mapeados os dois grupos devem ser analisados conjuntamente.

### **3. Resultados e Discussões**

#### **3.1. Comportamento espectral das rochas metavulcânicas da Formação Novo Horizonte.**

Observam-se na Figura 2A assinaturas espectrais de exemplares visualmente frescos das rochas metavulcânicas estudadas (Figura 2B). Apesar dos baixos valores de reflectância relativa, que chegam ao máximo a 0.2, é possível identificar feições de absorção quando estes espectros são estudados com remoção de contínuo. Notam-se muitas semelhanças entre os espectros, principalmente entre os de metarriolitos e metadacitos, o que permite concluir que não refletem propriamente a variação composicional entre as rochas, o que poderia constituir um instrumento de identificação entre elas. Apesar de não ser possível descartar a presença de feições tênues associadas aos constituintes minerais destas rochas (tais como feldspatos, principalmente os alcalinos) as feições diagnosticadas podem indicar o registro do efeito da alteração, provavelmente do tipo hidrotermal, já nestas amostras aparentemente mais preservadas. Observa-se como principal feição de absorção uma aguda e assimétrica tipicamente ligada a processos vibracionais de moléculas de AlOH, posicionada em aproximadamente 2,219 $\mu$ , normalmente conjugada com uma feição secundária posicionada em 2,253 $\mu$ , esta aparentemente tanto mais suave quanto mais evidente for a feição menos aguda e menos assimétrica em 1,928 $\mu$ , tipicamente relacionada à presença de moléculas d'água. Esta feição secundária pode persistir nos espectros de versões alteradas das mesmas rochas. Ocorre ainda com frequência, principalmente em metadacitos e metarriolitos, uma feição centrada em 2,35 $\mu$ , provavelmente ligada a presença de calcita secundária, já que minerais magnesianos não são comuns nestas rochas, e uma em 1,145 $\mu$ , associada a atividade de moléculas d'água ou de AlOH. Feições na região do visível são bastante variáveis e refletem a cor no geral cinza-rosada ou esverdeada das rochas no seu conjunto matriz-megacristais, ou também já alguma alteração para óxidos de ferro.

#### **3.2. Interpretação mineralógica das assinaturas espectrais das rochas metavulcânicas da Unidade Novo Horizonte afetadas por alteração hidrotermal**

Na figura 3A apresentam-se assinaturas espectrais medidas em amostras das diversas composições de rochas metavulcânicas afetadas por alteração hidrotermal (imagens de amostras alteradas podem ser visualizadas na figura 3B). Na grande maioria as análises espectrais das rochas, afetadas em graus variáveis por alteração tanto hidrotermal como

intempérica, resultam em espectros mistos da combinação de diversos minerais. Feições espectrais diagnósticas normalmente são preservadas nestas misturas de forma que é possível identificar-se as fases minerais envolvidas. Os principais minerais discriminados foram illita, sericita, caolinita, misturas de caolinita e esmectita (caoesmectita) e montmorilonita. Menos comum é a presença de dickita/pirofilita (observada apenas em amostras de metaquartzo pórfiro), clorita, barita, calcedônia e calcita (as duas últimas, concentrando-se em vênulas e bolsões e não disseminadas nas rochas). Observam-se também com muita frequência, principalmente nos espectros medidos em amostras mais intemperizadas, feições espectrais típicas de goetita, já feições sugestivas da presença de hematita ocorrem também nas amostras identificadas como afetadas essencialmente por alteração hidrotermal. Estas assembléias minerais são consistentes com alteração hidrotermal sob condições epitermais como descrito anteriormente (Guimarães et al. 2005). Espectros com feições diagnósticas das fases minerais mais significativas (e eventualmente suas combinações) foram selecionados para constar de assinaturas de referência no mapeamento espectral desenvolvido sobre dados ASTER.

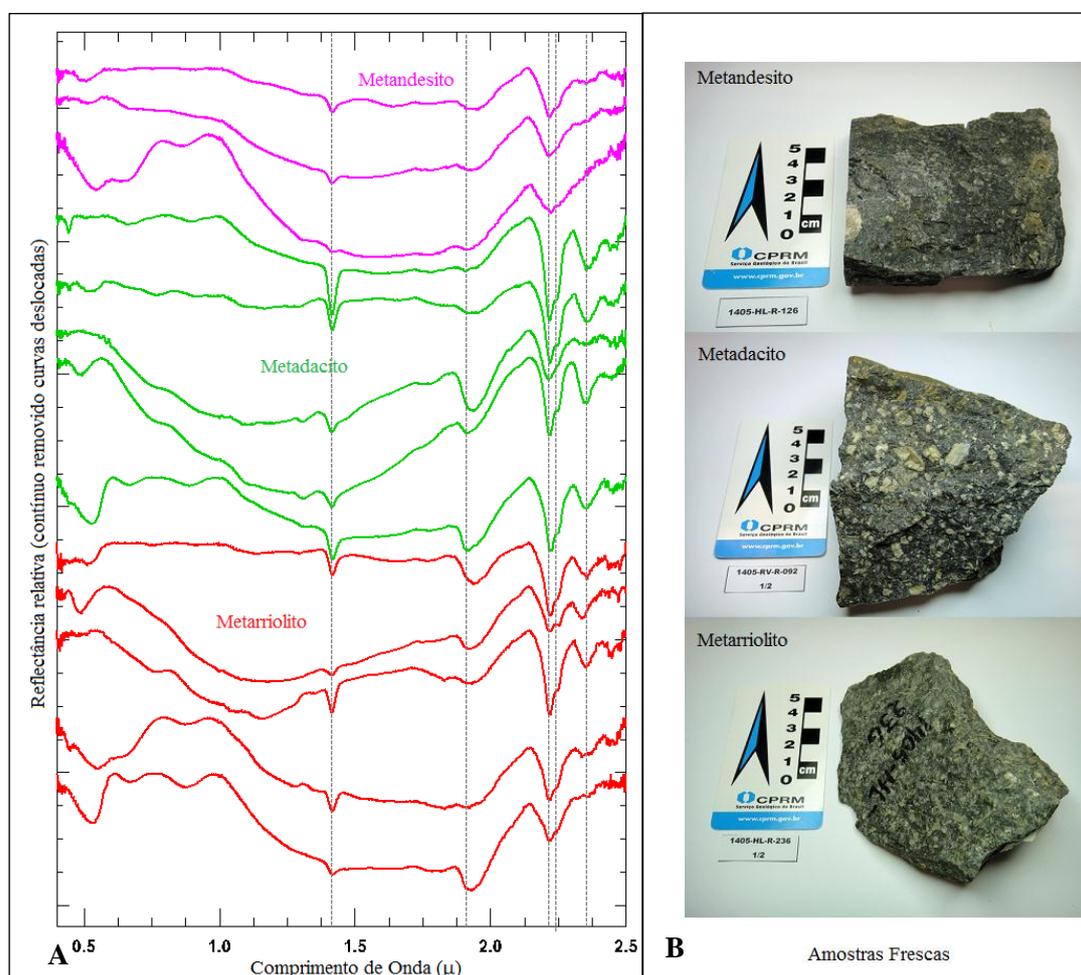


Figura 2. Assinaturas espectrais de rochas metavulcânicas frescas (A); fotografias de amostras de rochas metavulcânicas frescas (B).

### 3.3. Mapeamento espectral em imagem do sensor ASTER com base em espectros de referência medidos em laboratório

Comparando-se os resultados obtidos por meio da aplicação dos algoritmos de classificação espectral empregados, SAM e MTMF, observou-se em ambos a capacidade de reconhecer na imagem pixels similares aos membros finais de referência. Mas, num exame

visual dos espectros, observou-se maior coincidência das assinaturas minerais com pixels mapeados pelo método SAM. Este método foi capaz de mapear uma quantidade adequada de pixels coincidentes, mesmo assumindo-se uma diferença angular máxima de 0,02 rad entre o espectro de referência e o espectro do pixel analisado, além disso mapeou pixels localizados geograficamente nas áreas amostradas. Dessa forma o mapa da distribuição dos minerais de alteração hidrotermal apresentado na Figura 4 foi o gerado na modelagem pelo método SAM.

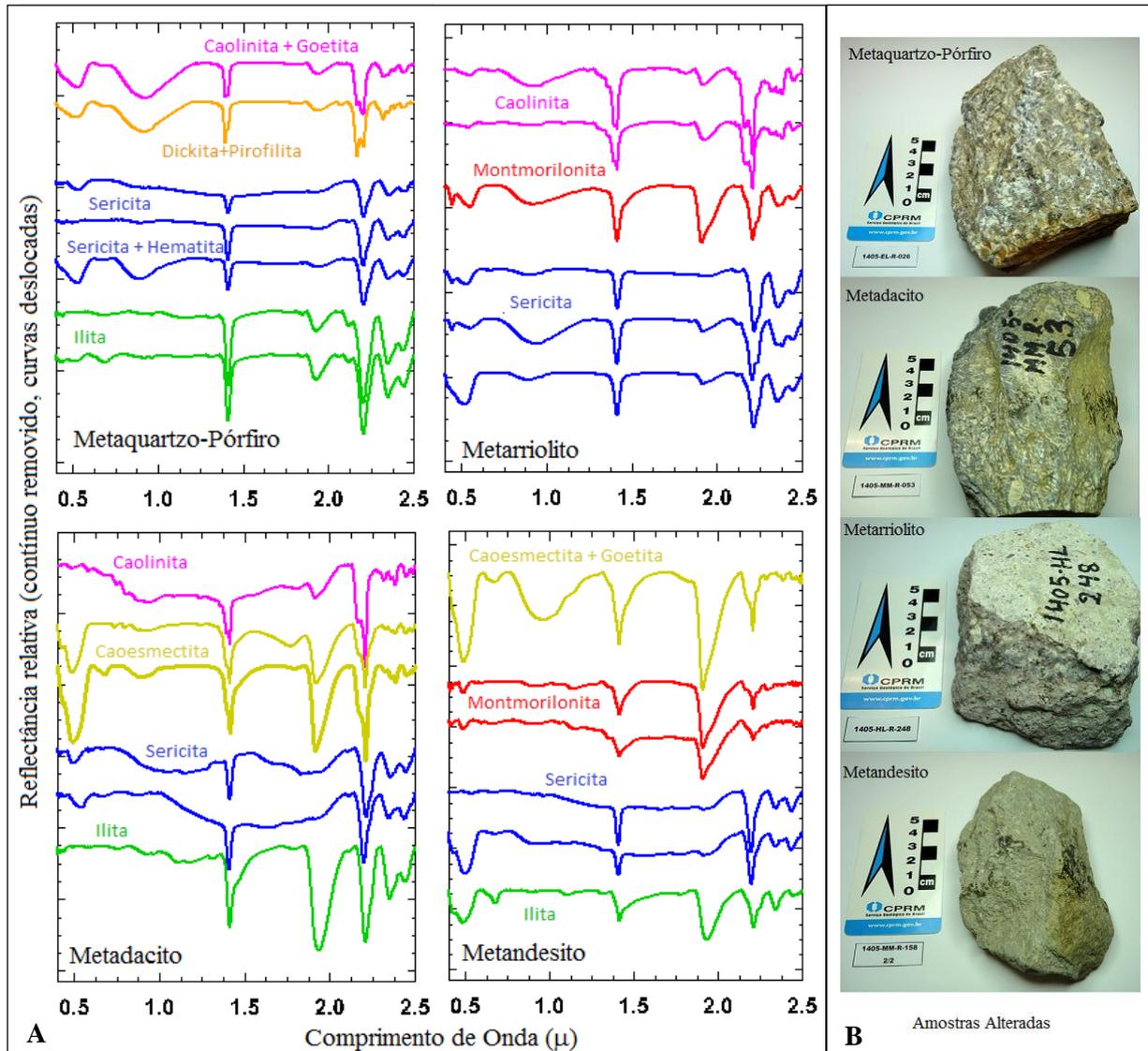


Figura 3. Assinaturas espectrais de rochas metavulcânicas alteradas (A); fotografias de amostras de rochas metavulcânicas alteradas (B).

#### 4. Conclusões

Os espectros das rochas frescas estudadas não permitiram a identificação de assinaturas discriminantes de sua variação composicional, o que já era esperado, dado que feições diagnósticas de silicatos estão posicionadas em comprimentos de onda mais elevados. Por outro lado, nas rochas alteradas as fases minerais presentes puderam ser adequadamente identificadas nos espectros mistos medidos em amostras brutas de rocha. Os minerais identificados, no geral gerados em processos metamórfico-hidrotermais mineralizantes, constituem indicadores de vários tipos de depósitos, com destaque para os metálicos. Estas assinaturas minerais de rochas alteradas mostraram-se ainda consistentes como membros

finais de referência no mapeamento espectral aplicado a dados de um sensor óptico com bandas espectrais suficientes e bem posicionadas. Estes resultados comprovam o potencial de aplicação dos dados registrados na Biblioteca Espectral do Serviço Geológico do Brasil como apoio ao mapeamento geológico e rastreamento de minerais de interesse na exploração mineral e estudos metalogenéticos.

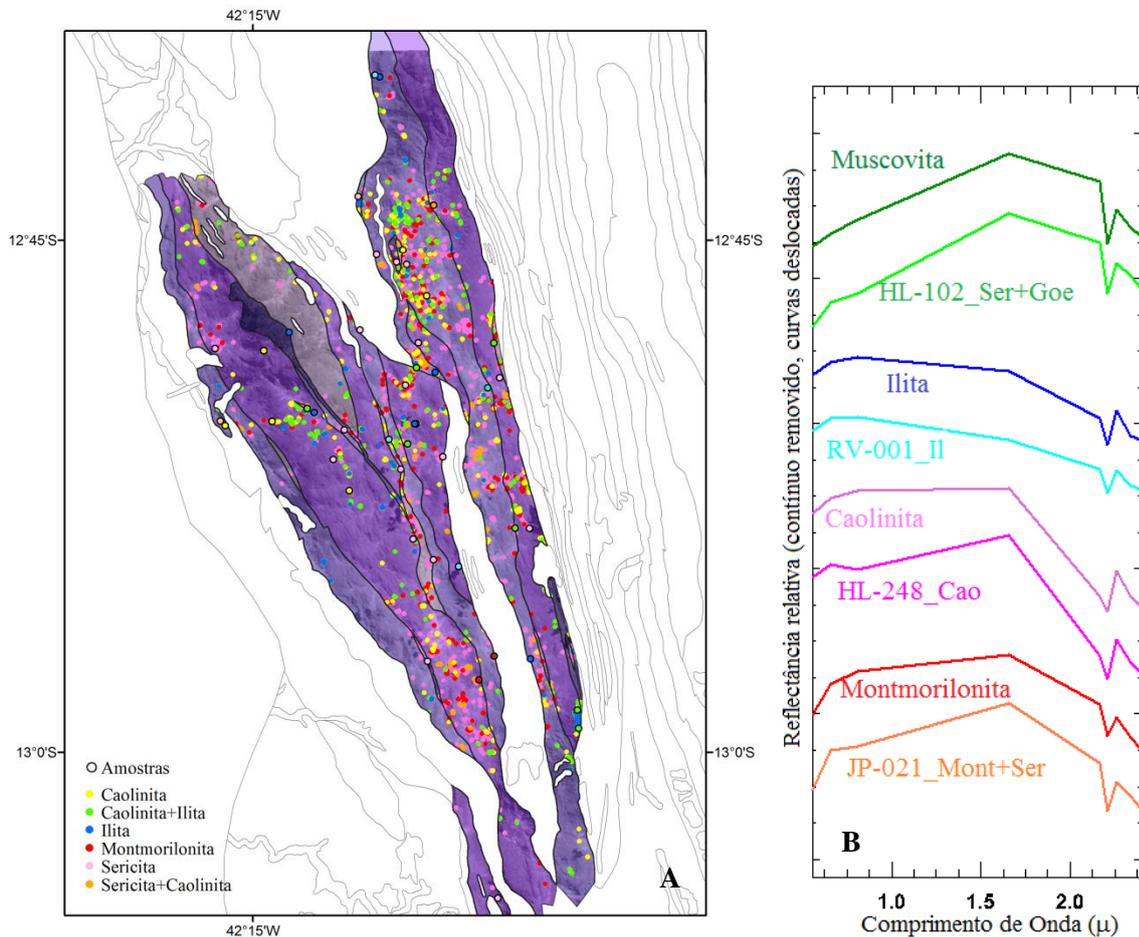


Figura 4. Mapa da distribuição dos minerais de alteração hidrotermal elaborado por mapeamento espectral em imagem ASTER (A). Espectros de referência reamostrados para resolução espectral do sensor ASTER (B).

## Referências Bibliográficas

Boardman, J. W.; Kruse, F. A.; Green, R. O. Mapping target signatures via partial unmixing of AVIRIS data. In: Summaries, Fifth JPL Airborne Earth Science Workshop. JPL Publication 95-1, v. 1, pp. 23-26, 1995.

Clark, R.N.; Swayze, G.A.; Wise, R.; Livo, E.; Hoefen, T.; Kokaly, R.; Sutley, S.J. USGS digital spectral library splib06a. U.S. Geological Survey, Digital Data Series 231, 2007.

ERSDAC (Earth Remote Sensing Data Analysis Center). **Aster product guide**. 2006. Disponível em: <[www.gds.aster.ersdac.or.jp/gds\\_www2002/service\\_e/release\\_e/set\\_release\\_ecrs.html](http://www.gds.aster.ersdac.or.jp/gds_www2002/service_e/release_e/set_release_ecrs.html)> Acesso em 2 jul. 2007

Guimarães, J.T.; Martins, A.A.M.; Andrade Filho, E.L.; Loureiro, H.S.C.; Arcanjo, J.B.A.; Neves, J.P.; Abram, M.B.; Silva, M.G; Melo, R.C.; Bento, R.V. **Projeto Ibitiara-Rio de Contas: Estado da Bahia**. Programa Recursos Minerais do Brasil. Salvador: CPRM, 2005. 157p.

Kruse, F. A.; Lefkoff, A. B.; Boardman, J. B.; Heidebrecht, K. B.; Shapiro, A. T.; Barloon, P. J.; Goetz, A. F. H. The Spectral Image Processing System (SIPS) - Interactive Visualization and Analysis of Imaging spectrometer Data. **Remote Sensing of Environment**, v. 44, p. 145-163, 1993.