

# Caracterização e modelagem de argilas utilizadas pela indústria cerâmica por espectroscopia de reflectância e dados multiespectrais ASTER - Um experimento no depósito de *ball clay* de São Simão, São Paulo

Juliano Alves de Senna<sup>1</sup>  
Carlos Roberto de Souza Filho<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP/IG/DGRN  
Caixa Postal 6152 - 13083-970 - Campinas - SP, Brasil  
{jsenna, beto}@ige.unicamp.br

**Abstract.** This study comprises the characterization of ceramic clays from the São Simão (SS) ball-clay deposit (São Paulo State) using reflectance spectroscopy (RS), and an evaluation of the potential of ASTER multispectral data and image products to map these clays remotely. Three classes of clays host in the SS deposit were distinguished by RS. The white clays (WC) show the most intense absorption features around 2.2 $\mu$ m, followed by the brown (BC) and gray (GC) clays. The WC is highly crystalline and contains the largest amount of kaolinite. The BC is abundant in Fe<sup>2+</sup>-bearing minerals. The GC is kaolinite-poor and show considerable content of expansive clay-minerals and organic matter. Considering the type of occurrence (alluvium), erosional process and mining practices, the spatial distribution of such materials in the SS deposit is uneven and difficult to map in the field. Spectral feature-oriented image processing of ASTER imagery allowed precise mapping of the three classes of clays using RS data as a control.

**Palavras-chave:** ball clays, ceramic, reflectance spectroscopy, ASTER; argilas do tipo *ball-clay*, cerâmica, espectroscopia de reflectância, ASTER.

## 1. Introdução

O depósito (aluvio-derivado) de argilas do tipo *ball-clay* de São Simão (SS) apresenta características singulares. Argilas dessa categoria são raras no mundo e o depósito de SS compreende a única ocorrência desse tipo de material no Brasil. Essas argilas têm funções especiais para indústria cerâmica, particularmente na confecção de louças e porcelanas. São argilas de granulometria fina (< 2 $\mu$ m), ricas em caulinita hexagonal; contém argilominerais expansivos, micas adsorvidas às faces (laterais) cristalinas das caulinitas (Pressinotti 1991) e matéria orgânica. As argilas de SS são caracterizadas pela elevada plasticidade e resistência em condições secas, extensa faixa térmica de vitrificação e cor clara após o processo de fusão (Wilson 1983).

O depósito de SS é localizado na região nordeste do Estado de São Paulo, aproximadamente 8km à oeste da cidade de São Simão (Figura 1), e encontra-se hospedado nos domínios do ribeirão Tamanduá.

Apesar da importância das argilas de SS, a sua caracterização do ponto de vista físico, químico e cerâmico durante os estágios pré- e -pós mineração, é uma tarefa complexa e dispendiosa, principalmente considerando-se métodos convencionais (e.g., difratometria de raios X). A cartografia sistemática dos diferentes tipos de argilas de SS, as quais encontram-se espacialmente distribuídas de forma irregular ao longo do depósito e possuem destinações distintas na indústria, também é um desafio ainda não atingido e que pode trazer impactos interessantes no processo de exploração do depósito. Assim, este trabalho tem como objetivos (i) avaliar o potencial da espectroscopia de reflectância como um método expedito, capaz de caracterizar as argilas de SS, incluindo definição dos tipos, composição, pureza e cristalinidade, e (ii) avaliar a possibilidade de mapeamento dessas argilas através de dados do sensor ASTER e técnicas de processamento digital.

## 2. Cenário Geológico do Depósito de São Simão

A geologia no entorno do depósito de SS (Figura 1) compreende as unidades litoestratigráficas do Grupo São Bento Grupo (rochas sedimentares das Formações Pirambóia e Botucatu e basaltos da Formação Serra Geral) e sedimentos cenozóicos. O ribeirão Tamanduá (Figura 1) ocupa o vale aberto, de direção N-S, encaixado em sedimentos mesozóicos. Este vale hospeda um sistema fluvial preenchido por sedimentos aluvionares. A deposição dos sedimentos iniciou-se a 30.000 anos atrás (Turcq et al. 1997).

A morfologia do aluvião é controlada pelo estrangulamento causado pelos diques e/ou soleiras de diabásio e a planície de inundação apresenta dois níveis geomorfológicos distintos: Aluvião I (Terraço 1) - nível atual do ribeirão (zona baixa) e Aluvião II (Terraço 2) - nível antigo (zona elevada) (Tanno *et al.* 1994, Pressinotti 1991). O Aluvião II possui sedimentos conglomeráticos sotopostos por espesso pacote arenoso; a estas areias encontram-se intercalados: níveis argilosos e níveis turfáceos. Os níveis argilosos são constituídos de lentes e/ou bolsões de argila de espessura máxima de 2 m (Tanno *et al.* 1994) e ocorrem até 8 m de profundidade (Ruiz 1990). Estes níveis estão dispostos irregularmente, sendo descontínuos longitudinalmente e correlacionáveis lateralmente (Pressinotti 1991). O depósito de *ball-clay* de SS corresponde a estas lentes, e compreende principalmente caulinitas finas, que exibem uma distribuição granulométrica bi-modal (Tanno *et al.* 1994).

As argilas formaram-se durante o Pleistoceno - informações baseadas em determinações de idade em material orgânico associado as mesmas (Turcq *et al.* 1997, Pressinotti 1991). Estudos paleohidrológicos indicam que a deposição das argilas ocorreu em dois estágios (períodos úmidos e secos), intercalados por períodos erosivos. A recente descoberta de lepidocrosita e siderita em diferentes porções do depósito (Senna 2003), sugere a deposição de argilas em clima frio e seco e em clima quente e úmido, respectivamente.

## 3. Materiais e Métodos

Os trabalhos de campo objetivaram a coleta de um grande número de amostras na área de estudo, na qual foram verificados: cor, textura, provável composição e etc. Neste processo, três classes, que incluem argila branca, marrom e cinza, foram identificadas (Figura 2). A caracterização espectral destas argilas foi verificada com a ajuda de análises de difratometria de raios X (DRX). A noção aqui foi estabelecer os parâmetros necessários para a discriminação qualitativa e quantitativa entre as amostras. Usando os resultados de DRX, foi possível aproximar a composição modal de amostras consideradas como representantes de cada classe. Um espectrômetro FieldSpec Full Resolution (0.35 $\mu$ m - 2.5 $\mu$ m) foi utilizado para as medidas espectrorradiométricas, as quais foram feitas em dois estágios. Primeiramente, amostras brutas coletadas no campo foram submetidas a vários tipos de leitura, dependendo da diversidade de materiais envolvidos; isto foi seguido por leituras de amostras finamente moídas (i.e., preparadas para a DRX). As amostras moídas foram originadas de uma parte integral de uma amostra bruta ou de uma porção específica desta, onde um material particular foi identificado. Para obter os espectros padrões para cada classe de argila, a média aritmética das respectivas leituras espectrais forma computadas.



Para a etapa de PDI foi utilizada uma imagem do sensor multiespectral ASTER (Abrams & Hook, 2002). A cena foi adquirida em 14/10/2000 (13h:41min) e está inscrita nas coordenadas (lat/long) 21°03'20''S/47°59'46''W e 21°43'15''S/47°22'39''W. Para esse estudo, optou-se pela aquisição do produto AST-07 junto à NASA, que compreende a correção atmosférica e conversão das 9 bandas do ASTER no espectro refletido (3 no VNIR (0.56-0.86  $\mu\text{m}$ ) e 6 do SWIR (1.6-2.43 $\mu\text{m}$ )) para reflectância aparente. AS 6 bandas do SWIR foram re-amostradas para 15m, de forma a serem utilizadas nas etapas posteriores de processamento em conjunto com as bandas do VNIR, que originalmente possuem essa resolução espacial. Essas bandas unidas foram então recortadas para abranger a área principal de estudo (Figura 2).

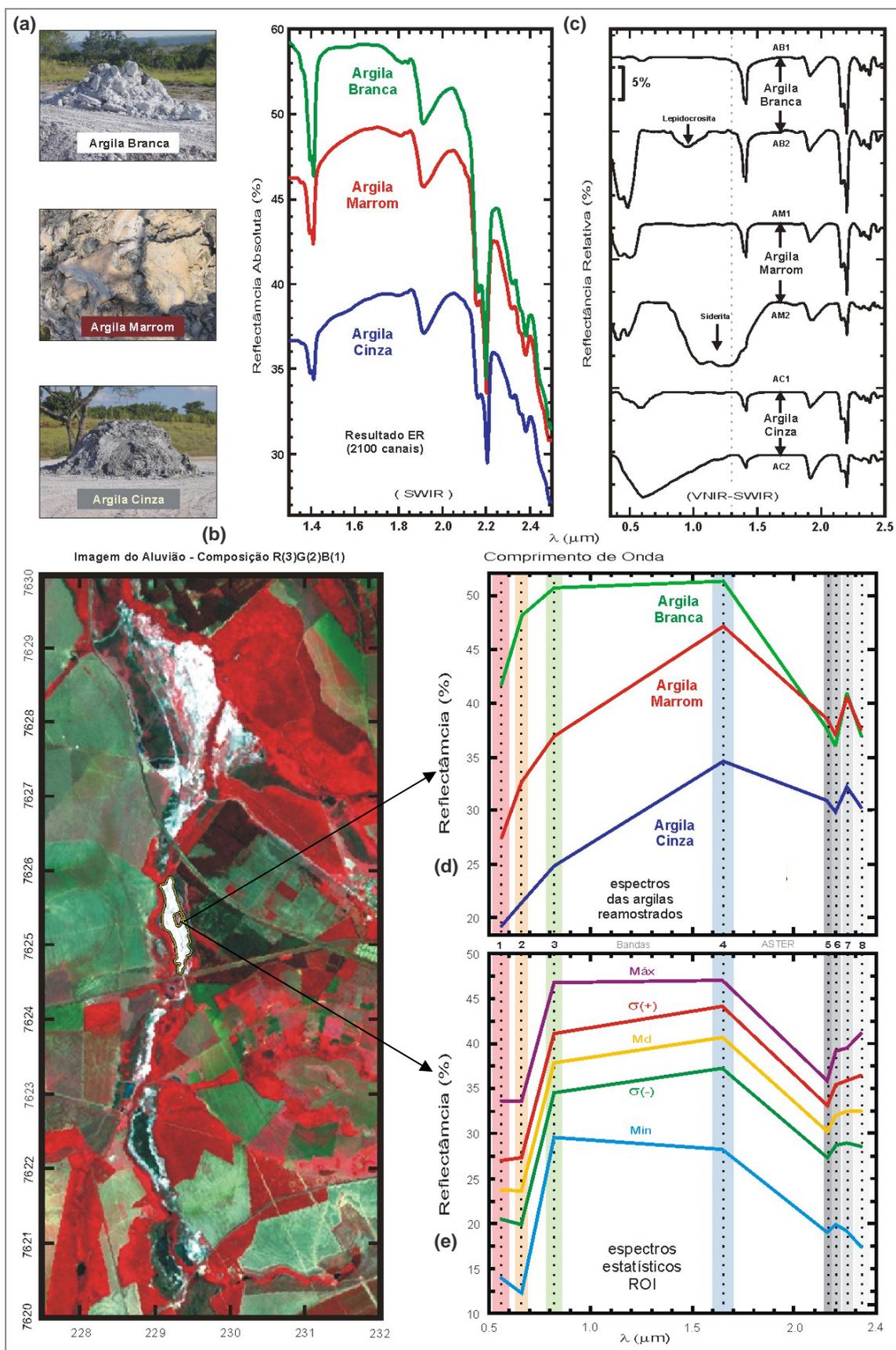
Com base nas assinaturas espectrais obtidas para cada tipo de argila (AB,AM,AC), uma biblioteca espectral de referência foi constituída para o depósito de SS, a qual foi re-amostrada para a resolução espectral do ASTER, visando uma avaliação sobre a separabilidade desses materiais nos dados multiespectrais (Figura 2).

O PDI foi baseado em técnicas hiperespectrais adaptadas aos dados do sensor ASTER, com ênfase no método de classificação espectral SAM (*Spectral Angle Mapper*). Esta técnica de classificação supervisionada compreende a comparação dos espectros coletados das amostras de campo (neste caso, a biblioteca espectral de SS) com os espectros dos pixels da imagem (de composição desconhecida). O SAM determina a similaridade espectral entre esses espectros, que são convertidos em vetores num espaço n-dimensional (n= número de bandas), com base na distância entre os mesmos medida em radianos (Kruse *et al.* 1993). Para cada um dos espectros de referência (ou *endmember*) utilizado, o SAM gerou uma imagem (que é denominada *rule image*), cujos pixels, individualmente, representam tais ângulos. Cada imagem *rule* foi interpretada segundo a condição de que quanto menor é o valor do pixel, maior é a probabilidade deste ser composto pelo material de referência computado. Para que os pixels de interesse fossem realçados, as imagens rules dos três tipos de argilas foram negadas (inversão do histograma). Essas imagens foram, em seguida, conjugadas na forma de uma composição colorida RGB, num produto onde foi possível analisar os resultados de classificação dos três *endmembers* num só produto. No sentido de diminuir o impacto de dados espúrios e de pixels classificados isoladamente, adicionalmente, um filtro de mediana foi aplicado. Esse conjunto foi então submetido à um ajuste interativo de histograma, buscando isolar-se somente os pixels de interesse, ou seja, aqueles que apresentam a maior similaridade possível com cada *endmember*.

Uma maneira de verificar o ângulo máximo dos parâmetros do método SAM, foi a confecção de um ROI (*Region of Interest*) na região central do aluvião (Figura 2). A estatística dos pixels deste ROI forneceram 5 valores distintos representados por espectros de referência (máximo,  $\sigma+$ , média,  $\sigma-$ , mínimo) (Figura 2), além de apontar a coerência entre o ângulo escolhido (0,05 radianos) para o processamento exploratório dos dados.

#### 4. Resultados

Análises de DRX mostraram que todas as classes de argila são ricas em caulinita (>70%). Com base na intensidade dos picos dos difratogramas, a argila branca é a mais rica em caulinita, enquanto na argila cinza o conteúdo desse mineral é menor. O quartzo está presente em todas as classes e varia entre 5% (AM) e 20% (AC). As micas, embora com conteúdo variável na AM e AB (proporções de 5% e 10%, respectivamente), são ausentes nas AC. Os argilominerais expansivos são encontrados principalmente na AC (5-10%) e são praticamente ausentes nas AB. A lepidocrosita (10%) ocorre em níveis alaranjados na AB e a siderite (5-10%) dentro de porções arenosas da AM.

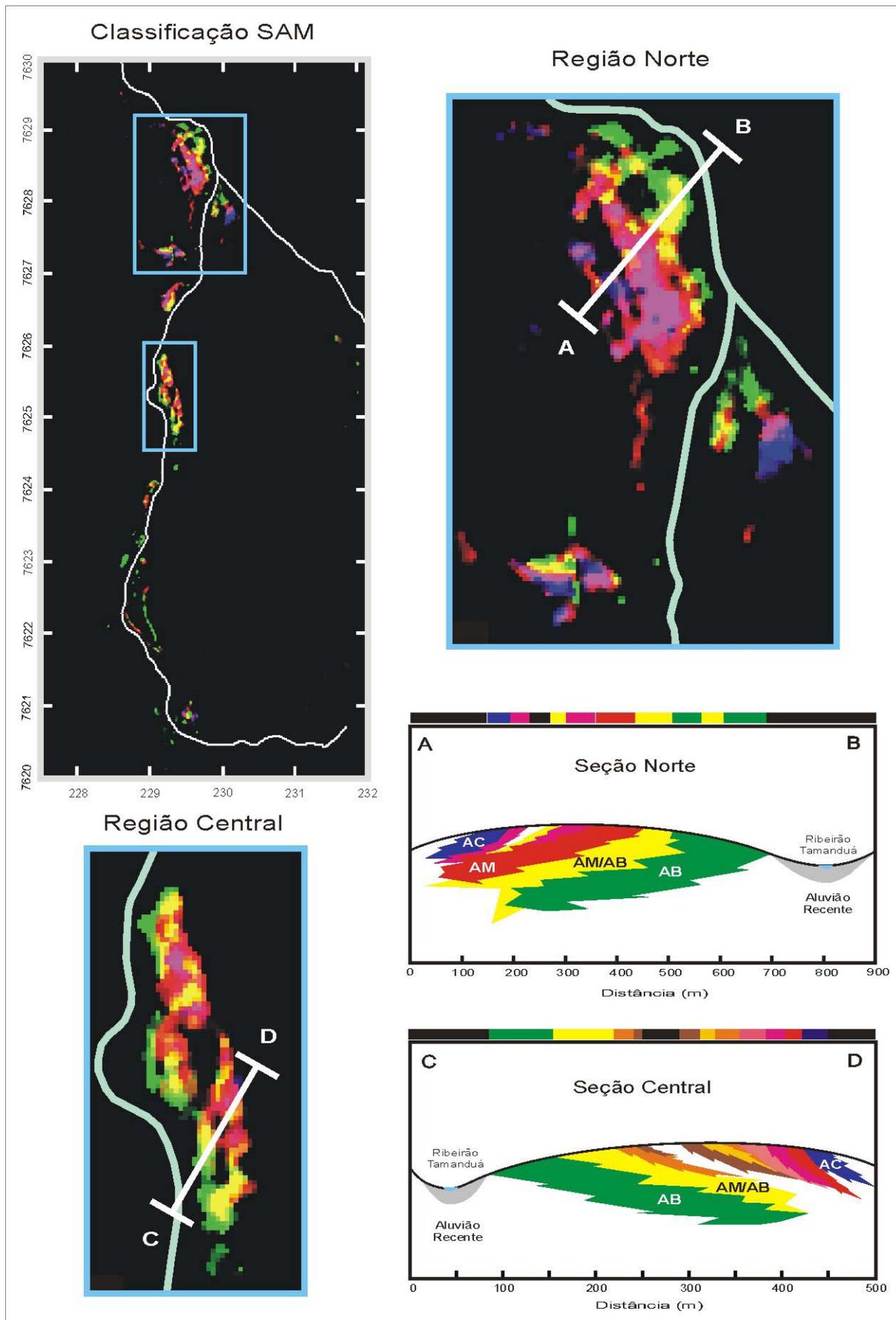


**Figura 2:** Depósito de SS: (a) tipos de argila; (b) imagem ASTER do aluvião (bandas 321 em RGB); (iii) assinaturas espectrais das argilas; (d) espectros das argilas re-amostrados para resolução espectral do sensor ASTER; (e) variação estatística da assinatura espectral global do depósito.

As análises de ER revelaram várias características espectrais distintas entre estas três argilas (Figura 2). A inspeção dos espectros de reflectância absoluto (Figura 2) para cada endmember mostraram que: as AB têm a maior absorção característica em torno de 2.2 $\mu$ m, seguidas pelas AM e AC. A forma (aguda) e o gradiente das feições de 1.4 e 2.2 $\mu$ m também são indicativas de que as AB são os espécimes mais cristalinos, particularmente devido à intensidade e inflexão do *doublet* centrado em torno destes comprimentos de onda. Além disso, o aparecimento combinado das feições de 1.4 $\mu$ m e 1.8 $\mu$ m, como observado para as AB, são indicadores fidedignos de mais alta cristalinidade (Pontual et al. 1997). O uso do espectro completo (0.35-2.50 $\mu$ m), com remoção do contínuo e normalização dos *endmembers* (empilhamento dos espectros) (Figura 2), permite a distinção de outros espécimes, um para cada classe. Nesse caso, não só aparecem diferenças de cristalinidade relativa mas também composicionais, incluindo a presença de impurezas. A curva AB2 mostra feições em 0.95  $\mu$ m, devido a presença do Fe<sup>3+</sup> hospedado pela lepidocrosita (Townsend 1987). A curva AM1 mostra absorções entre 1.05-1.25  $\mu$ m, típicas da siderita (Whitney 1983). As amostras AB2, AM1 e AM2 apresentam feições em 0.5 $\mu$ m decorrentes da presença de minerais de Fe. As curvas AC1 e AC2 mostram feições de absorção em 0.6 $\mu$ m, provavelmente devido às altas concentrações de matéria orgânica. É observado que a amostra AC2 (mais escura), mais rica em matéria orgânica, apresenta maior absorção nesta faixa. Os três tipos de argilas hospedas no depósito (SS), são perfeitamente separáveis espectralmente com base na ER. A técnica indicou que: (i) a AB inclui maior concentração de caulinita com alta cristalinidade, presença de micas e ocorrência de lepidocrosita; (ii) a AM contém proporção de caulinita sutilmente inferior a da AB e marcante presença de minerais de ferro (goethita e siderita); (iii) a AC possui menor quantidade de caulinita, e considerável presença de argilominerais expansivos e matéria orgânica.

Na imagem do aluvião resultante do PDI (Figura 3), os três tipos de argilas foram codificados com as seguintes cores na composição RGB: vermelho-AM, verde-AB, e azul-AC. Nessa figura, as tonalidades amarelo, ciano e magenta representam, respectivamente, as misturas: AB-AM, AB-AC e AM-AC. Nota-se que foi possível delinear o zoneamento mineral do aluvião Tamanduá com base nesse resultado. Os resultados provenientes das análises dos espectros estatísticos capturados do ROI (região central) mostraram-se muito similares, haja visto que o ângulo máximo calculado e o inferido para o tratamento com os espectros amostrados foram muito próximos entre si.

Este mapeamento interativo também propiciou a geração de um modelo deposicional, com base nas seções norte e central (Figura 3). Neste modelo as argilas brancas situam-se na base do aluvião - sua ocorrência está mais próxima do aluvião e a erosão do canal moderno foi fundamental para o afloramento de porções basais do pacote sedimentar. Em contrapartida, as argilas cinzas, mais distantes do aluvião, afloram em porções mais elevadas do terraço antigo, sugerindo que sua deposição foi ligada ao final do processo deposicional. A argila marrom foi depositada numa faz intermediária dentro deste ciclo deposicional. É certo que a distribuição lenticular do depósito favorece as intercalações entre estes materiais, detalhe confirmado pelas misturas espectrais apontado pelas cores primárias subtrativas (ciano, amarelo e ciano) do modelo (Figura 3).



**Figura 3:** Resultado do PDI e seções modelo nas duas principais regiões do depósito de SS.

## 5. Discussões e Conclusões

A ER caracterizou com sucesso as três classes de argilas observadas no depósito SS ball-clay sob os aspectos de composição, pureza e cristalinidade. A ocorrência de lepidocrosita (inédita em aluviões brasileiros) e a siderita (inédita no ribeirão Tamanduá) em amostras de argilas branca e marrom, respectivamente, marca a assinatura destas duas classes de argila. Um fato de grande interesse é a presença (ou ausência), tipo e quantidade de impurezas determinadas pela ER em cada argila, algo que tem uma correlação notável com a aplicação das mesmas na indústria cerâmica. Assim, devido à natureza exploratória desta pesquisa, os resultados usando a ER para caracterizar argilas industriais mostraram-se muito promissores.

O processamento de imagens multiespectrais ASTER permitiu mapear a distribuição espacial dos materiais discriminado pela ER na escala do aluvião, ilustrando que, embora os mesmos encontrem-se distribuídos de forma heterogênea, há uma nítida relação entre tipo de argila e seu respectivo ambiente deposicional.

Considerando-se que cada um dos tipos de argilas classificados no depósito de SS tem uma aplicação específica na indústria de cerâmica fina, os resultados aqui obtidos são importantes no sentido de demonstrar o potencial da ER e do processamento orientado de imagens ASTER como subsídio à caracterização e cartografia remota de materiais de uso industrial.

## 6. Referências Bibliográficas

- Abrams, M. & Hook, S. **ASTER User Handbook: Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer**. USA: NASA/Jet Propulsion Laboratory/California Institute of Technology, 2002. v. 2, 135p.
- Clark, R. N. 1999. Spectroscopy of Rocks and Minerals, and Principles of Spectroscopy, chapter 1. In: A.N. Rencz (eds.) **Remote Sensing for the Earth Sciences: Manual of Remote Sensing**, 3ed., vol. 3. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1999. p. 03-58
- Kruse, F.A.; Leflcoff, A.B.; Boardman J.W.; Heidebrecht K.B.; Shapiro A.T.; Barloon P.J.; Goetz A.F.H. The spectral image processing system (SIPS) - Interactive visualization and analysis of imagin spectrometer data. **Remote Sensing os Environment**. 44: 145-163. 1993.
- Pontual, S.; Merry, N.; Gamson, P. **Spectral Interpretation Field Manual**, G-Max. Spectral Analysis Guides for Mineral Exploration. Ferny Creek: AusSpec Int. Pty.Ltd.. 1997. v.1 1169 p.
- Pressinotti, M.M.N. 1991. **Caracterização Geológica e Aspectos Genéticos dos Depósitos de Argilas Tipo “Ball Clay” de São Simão, SP**. 1001. 141 p. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo-USP, São Paulo. 1991.
- Ruiz, M.S. **Argilas**. In: IPT - Instituto de Pesquisas Tecnológicas, Mercado Produtor Mineral do Estado de São Paulo - Levantamento e Análise. Pró-Minério - programa de Desenvolvimento de Recursos Minerais. São Paulo, 1990. perfil 4, cap. IV, p. 61-86.
- Senna, J.A. 2003. **Caracterização de Argilas de Utilização na Indústria Cerâmica por Espectroscopia de Reflectância**. 2003. 221 p. Dissertação (Mestrado em Metalogênese-Sensoriamento Remoto) - Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas - Unicamp, Campinas. 2003.
- Tanno, L.C.; Motta, J.F.M.; Cabral Junior, M.; Kaseker, E.P.; Pressinotti, M.M.N. Depósitos de Argilas para uso Cerâmico no Estado de São Paulo, cap.9. In: Schobbenhaus C., Queiroz E.T., Coelho C.E.S (eds.), **Principais Depósitos Minerais do Brasil-DNPM**. Brasília, 1994. v. IV-B (Rochas e Minerais Industriais), p. 99-110.
- Townsend, T.E. Discrimination of Iron Alteration Minerals in Visible and Near-Infrared Reflectance Data. **Journal of Geophysical Research**, 92 (B2): 1.441-1.454. 1987.
- Turcq, B.; Pressinotti, M.M.N.; Martin, L. Paleohydrology and paleoclimate of the Past 33,000 years at the Tamanduá River, Central Brazil. **Quaternary Research**, 47(3): 284-294. 1997.
- Whitney, G.; Abrams, M.J.; Goetz, A.F.H. Mineral Discrimination Using a Portable Ratio-Determining Radiometer. **Economic Geology**, 78(4): 688-698. 1983.
- Wilson, I.R. Ball Clays inglesas - origens, propriedades e usos em cerâmica. **Cerâmica**, 29(165): 217-238. 1983.