

Análise Radiométrica de Mistura Mineral e Avaliação de Seus Índices Morfométricos

OSMAR ABÍLIO DE CARVALHO JÚNIOR¹;
ANA PAULA FERREIRA DE CARVALHO²,
RENATO FONTES GUIMARÃES¹
PAULO ROBERTO MENESES³

¹Departamento de Geografia - Universidade de Brasília (UnB)- Campus Universitário Darcy Ribeiro, Asa Norte, 70910-900, Brasília, DF, Brasil
osmana@tba.com.br

²Departamento de Ecologia - Universidade de Brasília (UnB)- Campus Universitário Darcy Ribeiro, Asa Norte, 70910-900, Brasília, DF, Brasil

³Instituto de Geociências - Universidade de Brasília (UnB)- Campus Universitário Darcy Ribeiro, Asa Norte, 70910-900, Brasília, DF, Brasil

Abstract The present work evaluates the abundance of minerals estimate from spectral mixtures behavior, in macroscopic and microscopic (intimate) way. The analyzed minerals mixture are coming from lateritic nickel deposit: pimelite, goethite and Mn laterite (Fazenda Mine, Niquelândia, GO). Were made mixture simulations such in laboratory, from the intimate mixture of the minerals powder followed by the radiometric mensuration, as from mathematical simulation using linear function to describe the macroscopic mixtures. The abundance calculation of the minerals is estimated by indexes that compare morfometric values of the spectrum of the pure mineral with relationship to the spectrum of the mixture. In order to define the abundance of the mixture models was used the unmixed partial and scale coefficient. The abundance estimate in the intimate and macroscopic mixture can generate mistakes and should be corrected by mathematics adjustments with experimental data.

Keywords: Macroscopics Mixtures, Intimes Mixtures, Lateritic nickel.

1 Mistura Espectral

A mistura espectral é proveniente da integração de dois ou mais elementos distintos gerando um comportamento espectral híbrido de seus integrantes. Desta forma, o espectro de uma mistura é uma combinação das reflectâncias dos membros finais presentes. Pode-se distinguir dois tipos de mistura: a mistura macroscópica e a mistura microscópica ou mistura íntima.

1.1 Mistura Macroscópica

Esse modelo considera que a probabilidade de um fóton ser espalhado entre os constituintes de uma mistura é dependente apenas da área de contribuição de cada espécime constituinte e não de um prévio espalhamento do fóton (Johnson *et al.*, 1983). Este fato torna a reflectância espectral de uma determinada superfície uma combinação linear de seus indivíduos, sendo denominado de modelo *checkerboard*. Assim, a formulação do espectro resultante da mistura é obtida pela

simples média ponderada entre os espectros presentes sendo o valor do peso a proporção de área ocupada:

Esse modelo pode ser aplicado em superfícies com partículas grandes e rugosas onde relativamente pouca luz é espalhada entre as partículas. As condições para a existência de um comportamento macroscópico são asseguradas quando o espalhamento intra-partícula sobrepõe o espalhamento inter-partícula. Como a mistura macroscópica é toda baseada na relação linear entre os seus integrantes, houve um grande desenvolvimento de técnicas estatísticas visando sua estimativa.

1.2 Misturas Microscópicas ou Íntimas

Na mistura íntima, os componentes são aleatoriamente distribuídos e a luz é espalhada de forma múltipla entre as espécies minerais (Singer, 1981; Mustard & Pieters, 1989). Nesse tipo de mistura o comportamento espectral não é uma função linear dos membros finais. Vários métodos foram formulados com o propósito de estabelecer, a partir de uma mistura íntima de minerais, a proporcionalidade e abundância dos seus integrantes. Destaca-se dois tipos de modelos para a compreensão das misturas íntimas: teóricos (físicos) e empíricos.

a) Modelos Teóricos

Os modelos teóricos estão fundamentados nos princípios físicos de interação da energia eletromagnética com a mistura em estudo. Aproximações teóricas têm sido desenvolvidas para descrever a interação da luz com a superfície das partículas baseadas na teoria de transferência de radiatividade do Chandrasekhar (1960) (Hapke 1981, 1984, 1986; Lumme & Bowell, 1981).

Dentre esses modelos destaca-se o Modelo Hapke, que é fundamentado na reflectância bidirecional de misturas íntimas (Hapke & Wells, 1981; Clark & Roush, 1984). No entanto o modelo de Hapke requer múltiplas medições em diferentes geometrias de visada. Tais dados podem ser obtidos em laboratórios, e não com um sensor como o AVIRIS, cuja geometria é fixa, ou seja, não permite a obtenção da série de ângulos necessários para a completa caracterização fotométrica de toda a superfície. Portanto, o modelo Hapke requer uma geometria múltipla de visada, a qual não é, de forma comum, obtida pela corrente espectroscopia de imageamento. Desta forma, o cálculo de abundância vêm sendo desenvolvidos a partir de modelos empíricos.

b) Modelos Empíricos

Relacionam as propriedades mensuráveis das feições de absorção com a abundância dos membros finais. Esse tipo de modelo é específico para uma determinada mistura em estudo. Para cada mistura é requerida uma calibração em laboratório com uma série que abrange as diferentes proporções minerais, de forma a considerar todas as possibilidades existentes para as assembléias minerais em estudo (Adams, 1974; Singer, 1981; Cloutis *et al.*, 1986).

A partir das propriedades mensuráveis pode-se também desenvolver índices que melhor retratem o comportamento da mistura íntima. Entre esses índices, o que apresenta maior divulgação é a profundidade da banda de absorção (Clark & Roush, 1984). No entanto esse índice também deve ser calibrados de acordo com a abundância real do material (Clark & Lucey, 1984).

2 Metodologia

Para a análise de mistura espectral foi realizado simulações tanto de mistura macroscópica como de mistura íntima, gerando uma série contínua entre os membros finais. As misturas

macroscópicas foram simuladas de forma computacional utilizando proporções lineares. As misturas íntimas foram simuladas em laboratório a partir da mistura do pó dos minerais seguida da medição radiométrica. Deve-se destacar que na mistura íntima existe vários condicionantes que alteram o seu comportamento final como a granulometria e a rugosidade. Além disso, na natureza os minerais podem ocorrer de forma diferenciada que pode mascarar o resultado final do espectro como por exemplo as feições do tipo *red beds* onde os grãos de quartzo são envolvidos por uma camada goethítica. Desta forma, nesse trabalho é utilizado uma simplificação do que pode ocorrer na natureza.

Para os modelos de mistura foram calculados os seguintes índices: coeficientes angulares e lineares relativos a regressão linear entre o espectro padrão e o espectro da mistura (Harsanyi and Chang, 1994) e o coeficiente escala (Clark & Roush, 1984). Com a finalidade de avaliar as interferência de correlação dos espectros puros calculou-se também o índice de similaridade *Spectral Correlation Mapper* (SCM) (Carvalho & Meneses, 2000). A análise dessa metodologia foi testada para as misturas garnierita x goethita e garnierita x asbolana típicas do perfil de Ni-laterítico da mina Fazenda (Niquelândia, GO).

3 Análise da Abundância da Garnerita quando Misturada com a Goethita

Na mina da Fazenda a garnierita ao longo do perfil intempérico é misturada com a goethita, tanto na forma macroscópica como microscópica. Para o cálculo de abundância da garnierita utilizou-se a feição centrada em $2,29\mu\text{m}$, referente a ligação Mg-OH da pimelita o seu principal constituinte mineral. A série de mistura macroscópica é apresentada na **Figura 1** em intervalos de 10% de abundância. O comportamento do coeficiente angular e linear em relação a abundância de garnierita é linear (**Figura 2**). No entanto, observa-se que o valor do coeficiente angular não atinge o valor zero na inexistência da pimelita. Essa característica deve-se à correlação entre os espectros em análise que é demonstrado pelo SCM que atinge valores de 0,90 mesmo na inexistência do mineral (**Figura 3**). O coeficiente escala apresenta um comportamento não linear, porém não é tão afetado pela correlação dos espectros, obtendo valores próximos de zero na ausência da garnierita.

Para a série das misturas íntimas entre a goethita e a pimelita realizadas em laboratório utilizou-se também intervalos de 10% de abundância. O comportamento da banda de absorção da garnierita em diferentes proporções de mistura com a goethita é apresentada na **Figura 4**. Observa-se que o SCM na ausência da pimelita apresenta também valores altos demonstrando uma alta correlação entre os espectros. Os coeficientes calculados em relação a abundância apresentam disposto segundo funções lineares (**Figura 5, 6 e 7**).

4 Análise da Abundância da Garnerita Quando Misturada com a Asbolana

Na mineralização, a fácies garnierítica apresenta-se cortada por veios de asbolana. Apesar da presença da asbolana ser localizada, o emprego dessa mistura é interessante para demonstrar um outro tipo de comportamento de mistura espectral.

A **Figura 9** apresenta a série de misturas macroscópica entre a garnierita e a asbolana. O coeficiente angular estabelece uma perfeita relação linear expressando a porcentagem da amostra da garnierita (**Figura 10**). O coeficiente escala como era o esperado não obtêm o mesmo resultado. A feição retilínea da asbolana para a faixa do espectro analisada proporciona baixo valor de correlação entre os membros finais o que proporciona uma alta eficiência do coeficiente angular (**Figura 10**).

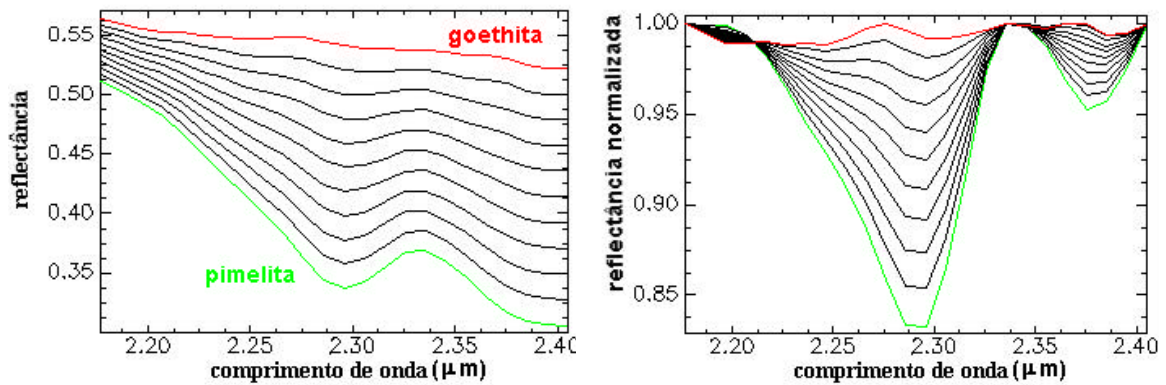


Figura 1– Simulação das misturas macroscópicas entre a pimelita e a goethita com intervalo de abundância de 10%: a) sem normalização (remoção do contínuo) e b) com normalização.

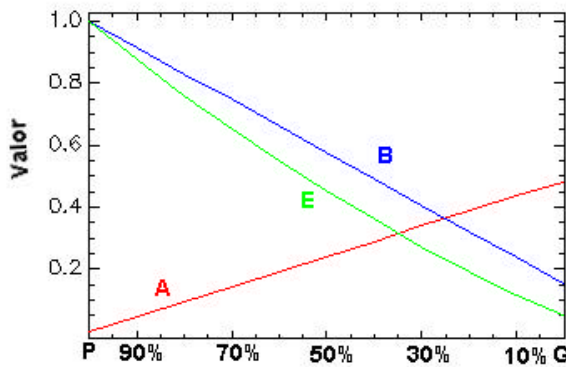


Figura 2– Comportamento do coeficiente angular (B), linear (A) e escala (E) para os modelos de misturas macroscópicas entre a pimelita e a goethita

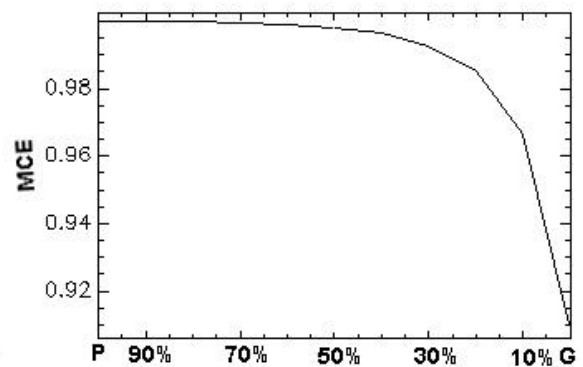


Figura 3 - Coeficiente de correlação (SCM) entre a pimelita e as curvas relativas à mistura macroscópica entre a pimelita e de goethita

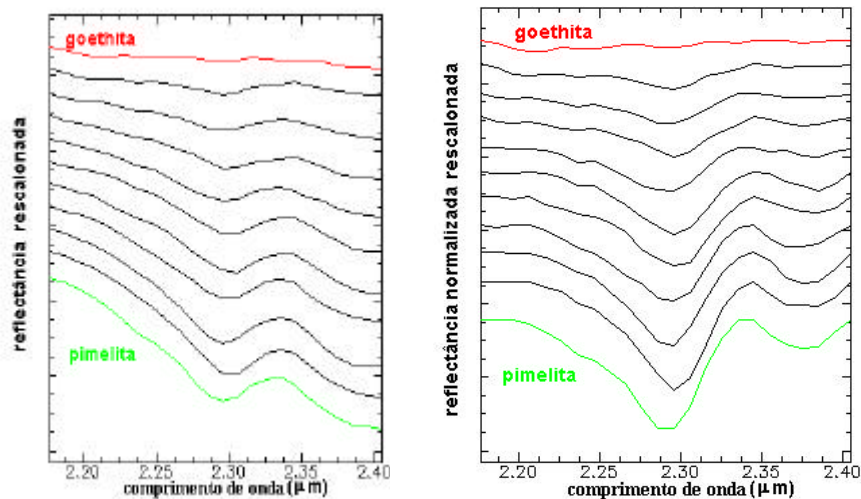


Figura 4 Simulação de mistura íntima entre a pimelita e a goethita com intervalo de abundância entre as curvas de 10%: a) sem normalização (remoção do contínuo) e b) com normalização.

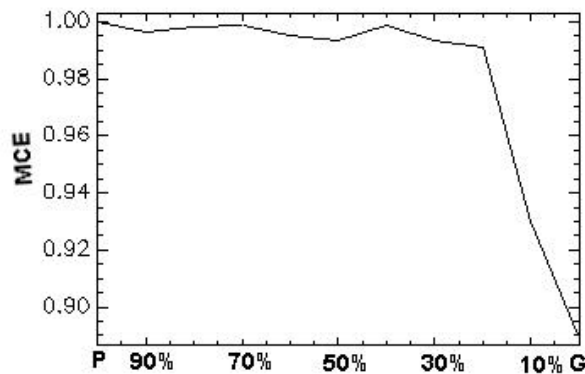


Figura 5 – Valores de SCM entre a pimelita e as curvas relativas à mistura com a goethita.

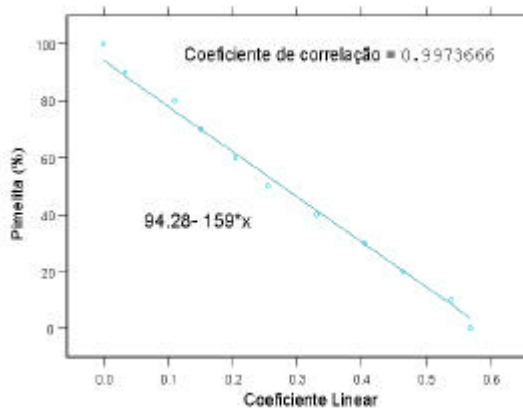


Figura 6 - Comportamento do coeficiente linear para a mistura íntima entre a pimelita e a goethita

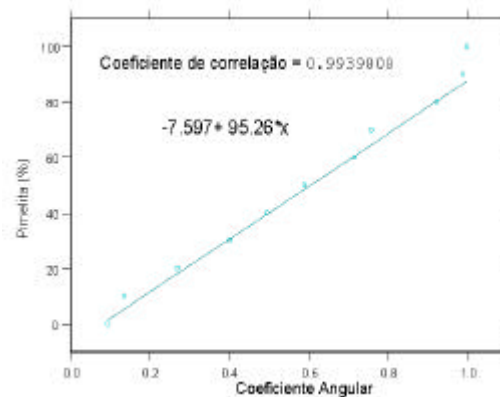


Figura 7– Comportamento do coeficiente angular para a mistura íntima entre a pimelita e a goethita.

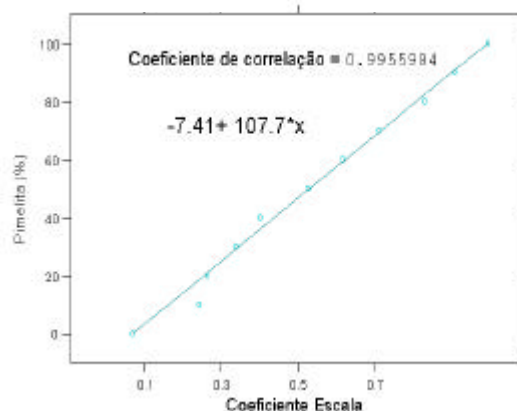


Figura 8– Comportamento do coeficiente escala para a mistura íntima entre a pimelita e a goethita apresentando uma distribuição linear.

Na mistura íntima observa-se uma intensa queda na reflectância da garnierita devido à presença da asbolana (**Figura 11**). Esses resultados são consistentes com estudos prévios de mistura de assembléias minerais de opacos com não opacos (Pieters, 1973; Nash & Conel, 1974; Singer, 1981; Madeira, 1991, Ribeiro *et al.*, 2000). O coeficiente angular e escala em relação à abundância de garnierita estão dispostos segundo uma função logarítmica (**Figuras 12 e 13**).

Nesse caso, o coeficiente escala não proporcionou uma linearização dos dados, demonstrando a importância do balizamento com dados experimentais. A função logarítmica determinada pode ser aplicada sobre a imagem hiperespectral proporcionando uma melhor estimativa da quantidade da pimelita para áreas com mistura com asbolana.

CONCLUSÃO

Como cada mistura apresenta especificidade de comportamento, o emprego de simulações permite verificar e corrigir determinados equívocos inerentes aos métodos. Observa-se que os índices morfométricos fornecem uma escala de valores que devem ser balizados por dados experimentais tanto na mistura íntima como na mistura macroscópica.

Na mistura macroscópica o coeficiente angular da regressão linear entre o espectro padrão e o espectro da mistura pode apresentar superestimativas na existência de correlação entre os espectros. Nos experimentos realizados a abundância da garnierita na mistura com a goethita através do coeficiente angular ficou prejudicada devido a essa correlação. Na mistura íntima os índices morfométricos mostram-se também vulneráveis devendo sofrer ajuste com dados experimentais, principalmente, quando existe forte diferença de albedo. O emprego da função logarítmica apresentou excelentes resultados para a calibração desse tipo de mistura.

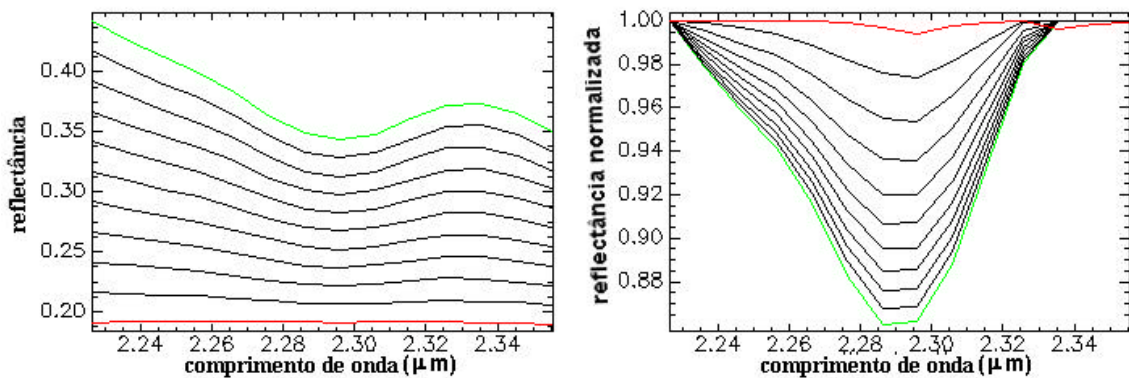


Figura 9– Simulação da mistura macroscópica entre a pimelita (verde) e a asbolana (vermelho), com intervalo de 10%: a) sem normalização (remoção do contínuo) e b) com normalização .

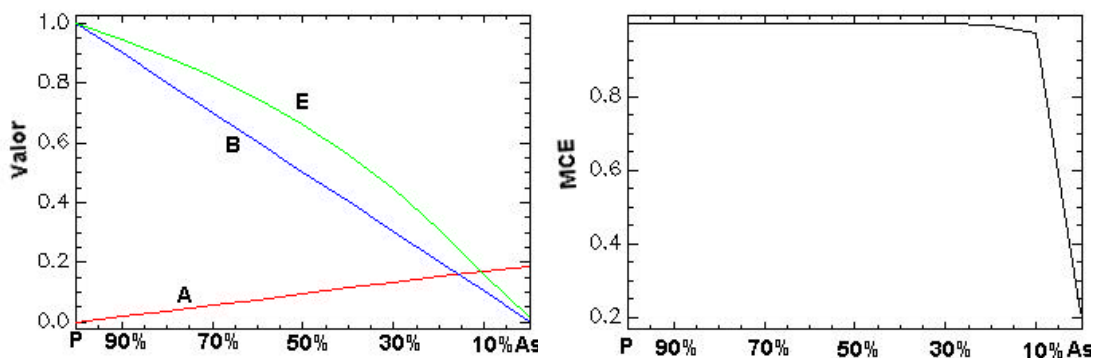


Figura 10– a) Comportamento do coeficiente angular (B), linear (A) e escala (E) para as simulação de misturas macroscópicas entre a pimelita e a asbolana b) Coeficiente de correlação (MCE) entre a pimelita e as curvas relativas às misturas macroscópicas entre a pimelita e a goethita

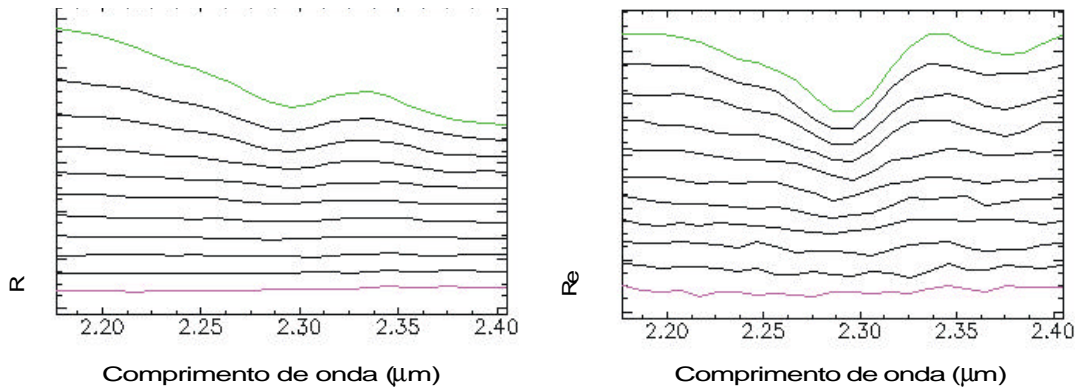


Figura 11 – Simulação de mistura íntima da pimelita (verde) e asbolana (magenta) em intervalo de 10% a) sem normalização (remoção do contínuo) e b) com normalização.

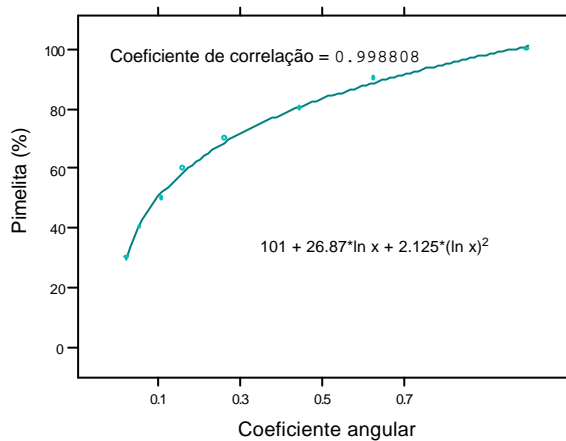


Figura 12– Comportamento logarítmico do coeficiente angular para a mistura íntima entre a pimelita e a asbolana.

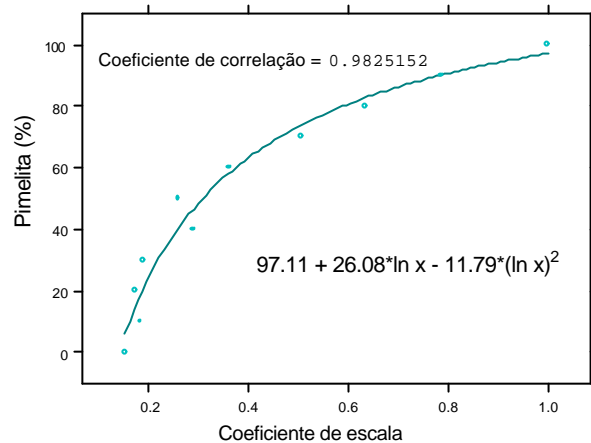


Figura 13– Comportamento logarítmico do coeficiente escala para a mistura íntima entre a pimelita e a asbolana.

Outras simulações para mistura íntima variando a granulometria e rugosidade também são necessárias para um melhor controle do processo. A quantificação de mistura íntima na espectroscopia de imageamento ainda apresenta muitas dificuldades, constituindo um vasto campo para pesquisa

Referências

- Adams, J. B., 1974, Visible and near-infrared diffuse reflectance: Spectra of pyroxenes as applied to remote sensing of solid objects in the solar system. *J. Geophys. Res.*, 79, 4829 - 4836.
- Carvalho Jr., O. A. & Menezes, P. R., 2000, Spectral Correlation Mapper (SCM): na Improving Spectral Angle Mapper. Presented in the *Nineth JPL Airborne Earth Science Workshop*. February (no prelo).
- Clark, R. N. & Lucey, P. G., 1984, Spectral properties of ice-particulate mixture and Implications for Remote Sensing 1. Intimes Mixtures. *J. Geophys. Res.*, 89, 6341-6348

- Clark, R. N. & Roush, T. L., 1984, Reflectance Spectroscopy: Quantitative analysis techniques for remote sensing applications. *J. Geophys. Res.*, 89, 6329-6340.
- 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, *J. Geophys. Res.*, vol. 91, NO. B11, pg. 11641-11653.
- Hapke, B., 1981, Bidirectional reflectance spectroscopy, 1, Theory, *J. Geophys. Res.*, 86, 3.039-3.054.
- Hapke, B. & Wells, E., 1981, Bidirectional reflectance spectroscopy, 2, Experiments and observations, *J. Geophys. Res.*, 86, pp. 3.055-3.060.
- Hapke, B., 1984, Bidirectional reflectance spectroscopy, 3, Correction for macroscopic roughness, *Icarus*, 59, 41-59.
- Hapke, B., 1986, Bidirectional reflectance spectroscopy, 4, The extinction coefficient and the opposition effect, *Icarus*, 67, 264-287.
- Harsanyi and Chang, 1994, Hyperspectral image classification and dimensionality reduction: A orthogonal subspace projection approach: *IEEE Trans. Geosci. and Remote Sens.*, v.32, p.779-785.
- 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, *J. Geophys. Res.*, 88, 3557-3561.
- Lumme, K. & Bowell, E., 1981, radiative transfer in the surfaces of atmosphereless bodies, I, Theory, *Astron. J.*, 86, 1.694-1.704.
- Madeira Netto, J. S. 1991. Étude quantitative des relations constituants mineralogiques-reflectance diffuse des latosols brésiliens/application a l'utilisation pedologique des données satellitaires TM (region de Brasília). Thèse de Doctorat, Université Pierre et Marie Curie. Paris. 224 p.
- Mustard, J. F. & Pieters, C. M., 1989, Photometric phase functions of common geologic minerals and applications to quantitative analysis of mineral mixture reflectance spectra. *J. Geophys. Res.*, Vol. 94, No B10, pp. 13.619-13.634.
- Nash, D. B. and Conel, J. E., 1974, Spectral reflectance systematics for mixtures of powdered hypersthene, labradorite, and ilmenite, *J. Geophys. Res.*, 79, 1615-1621.
- Pieters, C. B., 1973, Polarization in mineral absorption band, in *Planets, Star and Nebulae Studied with Photopolarimetry*, edited by T. Gehrels, pp. 405-418, University Arizona Press, Tucson, 1973.
- Ribeiro, M. N. C.; Carvalho Jr., O. A.; Guimarães, E. M. & Meneses, P. R., 2000, Integral Spectral Analysis (ISA) applied to AVIRIS data for manganese mineralized laterites in São João da Aliança /GO, Brazil, *Nineth JPL Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer (AVIRIS) Workshop*, JPL Publication (no prelo).
- Singer, R. B., 1981, Near-infrared reflectance of mineral mixtures: Systematic combinations of pyroxenes, olivine, and iron oxides, *J. Geophys. Res.*, 86, 7967-7982.