

# CARACTERIZAÇÃO DA REFLECTÂNCIA ESPECTRAL DE PERFIS DE SOLOS DA REGIÃO SUDESTE DO BRASIL

L. S. GALVÃO, A. R. FORMAGGIO, I. VITORELLO, J. DE FREITAS FILHO,  
M. E. MAZZOCATO, R. B. TORRES E H. F. ESPINOZA  
INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais  
Caixa Postal 515, São José dos Campos (SP), CEP. 12201-970

**Abstract.** Principal Components Analysis (PCA) was applied to visible and near-infrared spectra of soil samples collected in six different profiles from southeastern Brazil. The objective was to characterize the spectral reflectance variations among and within the different soil profiles. The results indicated that the albedo and spectral slope variations are related to the first and second component, respectively. The albedo of the soils is better explained by the variations in  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  and  $\text{Al}_2\text{O}_3$  contents which presented the best correlations with reflectance. On the other hand, the spectral transition between superficial and sub-superficial soil horizons is characterized mainly by changes in spectra slope. In general, spectra of sub-superficial samples show decreasing slope towards the near-infrared interval or smaller NIR/VIS ratios, because an increase in clay fraction, and sometimes, a decrease in organic matter content, from A to B or C horizons, produce a decrease in reflectance in the near-infrared interval (or deeper 2200-nm absorption bands), and higher reflectance values in the visible portion, respectively.

**Keywords:** reflectance, soils.

## 1. Introdução

Até recentemente, costumava ser uma tarefa difícil encontrar espectros de solos tropicais brasileiros na literatura, com exceção de umas poucas curvas de reflectância publicadas por Stoner et al. (1980). O fato é que quando comparados com os solos de regiões temperadas, os solos tropicais brasileiros têm sido alvo de poucos estudos visando a caracterização de seu comportamento espectral na faixa 400-2500 nm (p. ex., Madeira Netto 1993, Valeriano et al. 1995). Desta forma, pouco se conhece sobre a influência de seus constituintes sobre os padrões de variações espectrais observados nos horizontes superficiais, e praticamente nada se conhece sobre as variações espectrais existentes ao longo de seus perfis.

Neste contexto, o objetivo deste trabalho é caracterizar as relações de similaridade espectral entre diferentes perfis de solos brasileiros e no interior de cada perfil. Para tal finalidade, uma abordagem baseada em Análise por Componentes Principais

(ACP) foi aplicada em espectros de reflectância (400-2500 nm) de 35 amostras coletadas em 6 perfis de solos do Estado de São Paulo.

## 2. Metodologia de Trabalho

A partir de uma coleção de amostras, coletadas em levantamentos de solos previamente executados no Estado de São Paulo pelo Instituto Agrônomo de Campinas (IAC), foram selecionadas 35 amostras referentes a seis perfis de solos: Latossolo Roxo (LR), Latossolo Vermelho-Escuro (LE), Podzólico Vermelho-Amarelo de textura arenosa (PV1), Podzólico Vermelho-Amarelo de textura areno-argilosa (PV2), Podzólico Vermelho-Amarelo de textura argilosa (PV3) e Cambissolo (CB). Para cada amostra, dispõe-se de dados químicos (% $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{TiO}_2$ , ferro total expresso neste trabalho como  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), além de determinações de carbono orgânico.

As amostras foram peneiradas para remover partículas superiores a 2 mm. O

Fator de Reflectância Bidirecional (FRB) de cada amostra foi determinado com o espectrorradiômetro IRIS (Infra-Red Intelligent Spectroradiometer), que faz leituras em intervalos de 2 nm, entre 400 e 1000 nm, e em intervalos de 4 nm, entre 1000 e 2500 nm. O equipamento foi posicionado ao nadir e a fonte de iluminação, uma lâmpada halógena de tungstênio de 600 W de potência, foi ajustada a um ângulo de 15° do mesmo. Uma placa de spectralon foi utilizada como referência.

Análise por Componentes Principais (ACP) foi utilizada para estudar as relações de similaridade espectral das amostras entre perfis e no interior de cada perfil. Componentes Principais é uma técnica de redução de dimensionalidade de dados de aplicações variadas na literatura. Exemplos de aplicações de ACP em análise de espectros de reflectância podem ser vistos em Smith et al. (1985), Galvão e Vitorello (1995) e Galvão et al. (1995). No presente trabalho, valores de reflectância de bandas estreitas (10 nm de largura), posicionadas em intervalos regulares de 100 nm na faixa 400-2500 nm, foram extraídos de cada espectro. Estes valores foram utilizados para o cálculo de uma matriz de correlação, a partir da qual autovalores e autovetores foram obtidos. A similaridade espectral dos solos foi analisada através da projeção dos escores componentes principais. Um exemplo do cálculo destes escores é apresentado por Davis (1986).

### 3. Resultados e Discussão

#### 3.1. Análise por Componentes Principais (ACP)

A Figura 1 ilustra a projeção dos dois primeiros escores componentes principais, onde pequenas distâncias entre amostras indicam similaridade espectral. De acordo com a análise dos fatores de peso (não mostrados neste trabalho) associados a cada autovetor, a primeira componente (CP1), responsável por 94% da variância dos dados, pode ser interpretada como uma medida da variação de albedo das amostras. Na Figura 1, o albedo aumenta da esquerda para a direita do

eixo CP1, ou seja, do Latossolo Roxo (LR) para o Cambissolo (CB), conforme ilustrado pelos espectros do horizonte A destes solos mostrados na Figura 2.

A segunda componente (CP2), responsável por cerca de 4% da variância dos dados, expressa as variações de declividade dos espectros. Na Figura 1, o que caracteriza mais fortemente a transição espectral do horizonte A para os horizontes B e C dos diferentes perfis de solos não são as variações de albedo, mas sim as variações de declividade dos espectros expressas por um deslocamento preferencial das amostras do topo para a base da segunda componente (CP2).

Para se ter uma melhor compreensão do segundo autovetor, nós plotamos na Figura 3 três pares de espectros dos horizontes superficial e subsuperficial de Latossolo Roxo (LR), Latossolo Vermelho-Escuro (LE) e Podzólico Vermelho-Amarelo de textura arenosa (PV1). Para todos os solos mostrados nesta figura, amostras do horizonte B ou C, com escores CP2 negativos, tendem a ter maiores reflectâncias no visível e menores no infravermelho do que as amostras do horizonte A, com escores CP2 positivos. Conseqüentemente, qualquer razão de reflectância infravermelho próximo/visível (NIR/VIS) tende a crescer da base para o topo da segunda componente, especialmente a razão 2500/600 nm, comprimentos de onda que compreendem os mais intensos fatores de peso positivos e negativos, respectivamente, do segundo autovetor. Portanto, os solos dos horizontes B ou C, em relação aos do horizonte A, tendem a ter espectros com declividade mais descendente no infravermelho.

#### 3.2. O espaço CP e os constituintes dos solos

##### 3.2.1. Variação de albedo das amostras

Dos constituintes analisados, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> parecem ser os mais importantes para explicar a variação de albedo das amostras ou dos escores CP1 na Figura 1. Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> apresentou as melhores correlações com a reflectância na faixa 400 a 2500 nm (valores de r entre -0,7 e

-0,85), enquanto os melhores resultados para  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , um indicador da presença de minerais argilosos, foram observados entre 2000 e 2500 nm (valores de r em torno de -0,8). Feições de dupla absorção, típicas do mineral caolinita, às vezes são observadas em 1400 e 2200 nm (p. ex., espectro de Latossolo Vermelho Escuro (LE) na Figura 3). Conforme indicado, as correlações foram negativas mostrando a tendência da diminuição da reflectância dos solos com o aumento no conteúdo destes constituintes, embora estas relações possam ser melhor expressas por ajustes não-lineares sobre os dados, de acordo com a análise de diagramas de espalhamento não mostrados neste trabalho.

Na Figura 1, perfis de solos com maior albedo (PV1, PV2 e CB), com escores CP1 positivos, tendem a ter menos que 7% de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  e menos que 12% de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , ocorrendo o contrário para solos de albedo mais baixo (LR, LE e PV3) com escores CP1 negativos.

Na literatura, diversos trabalhos têm demonstrado os efeitos espectrais da matéria orgânica diminuindo a reflectância dos solos (p. ex., Bowers e Hanks 1965, Mathews et al. 1973, Stoner e Baumgardner 1981, Henderson et al. 1992). Neste trabalho, um pico de correlação negativa foi observado entre 600 e 700 nm, que no entanto apresentou um valor baixo ( $r = -0.43$ ). Galvão (1994) observou um interrelacionamento entre ferro e matéria orgânica nos solos do sudeste do Brasil, após estratificar as amostras de diversas classes de solo em três grupos com diferentes teores de C orgânico. Ele verificou que as correlações entre reflectância e  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  na faixa do visível eram progressivamente melhores na direção do grupo mais pobre em matéria orgânica, com menos de 1% de C. No presente trabalho, cerca de 80% das amostras possui menos que 1% de C orgânico, e cerca de 90% possui menos que 1.5%, o que justifica as boas correlações da reflectância com o  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  obtidas na faixa do visível. Matéria orgânica tende a ser um constituinte espectralmente importante no horizonte superficial dos solos, onde ocorre em maiores quantidades. Nos horizontes de subsuperfície, devido a redução no conteúdo deste

constituente para valores, em geral, abaixo de 1%, o ferro tende a assumir um papel espectral mais importante.

*3.2.2. Variação de declividade dos espectros*  
Conforme visto na Figura 3, a transição espectral do horizonte A para os horizontes B ou C é caracterizada principalmente por modificações na declividade dos espectros. Espectros de amostras de subsuperfície tendem a ter declividade mais descendente no infravermelho, ou menores razões NIR/VIS, do que os espectros de amostras do horizonte superficial. No espaço CP, isto é expresso por um deslocamento das amostras do topo para a base do eixo CP2 da Figura 1.

De um ponto de vista químico, o caráter mais descendente da declividade dos espectros no infravermelho pode ser explicado pelas variações no conteúdo de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ou da fração de argila, responsável por fortes bandas de absorção em 2200 nm. Este constituinte apresentou as melhores correlações com a reflectância no intervalo 2000-2500 nm. É importante destacar que a redução no conteúdo de matéria orgânica do horizonte A para o B é responsável em alguns solos por um aumento de reflectância na faixa do visível, o que também contribui para menores razões NIR/VIS para espectros de amostras de subsuperfície.

#### 4. Conclusões

Os resultados deste estudo indicam que  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  e  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , cujo conteúdo varia significativamente ao longo dos diferentes perfis de solos, são os principais responsáveis pela variação de albedo das amostras analisadas. Matéria orgânica influencia a resposta espectral na faixa do visível, mas desempenha um papel secundário, visto que a maior parte das amostras possui menos que 1% de C orgânico. Em solos de baixo albedo como Latossolo Roxo (LR), com mais que 20% de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  e menos que 20% de reflectância em 1500 nm, a forte presença de minerais opacos, especialmente magnetita, confere um aspecto liso aos espectros que são, portanto, desprovidos de bandas de absorção. Desta forma, perfis de LR são caracterizados

por uma homogeneidade espectral marcante, tanto a nível de superfície, quanto de subsuperfície, com pequenas variações de albedo e declividade das curvas.

A mudança de declividade dos espectros caracteriza a transição espectral do horizonte A para os demais horizontes. O aumento na fração argilosa de superfície para subsuperfície provoca uma diminuição substancial da reflectância entre 2000 e 2500 nm e o surgimento de bandas de absorção bem definidas em 2200 nm, especialmente para solos de maior albedo. Em muitos casos estas bandas são típicas do mineral caolinita. Por outro lado, a redução no conteúdo de matéria orgânica com a profundidade provoca em alguns solos (p. ex., PV3) um aumento da reflectância na faixa do visível. Conseqüentemente, menores razões NIR/VIS ou espectros com declividade mais descendente no infravermelho são normalmente observados do horizonte A para os horizontes B ou C.

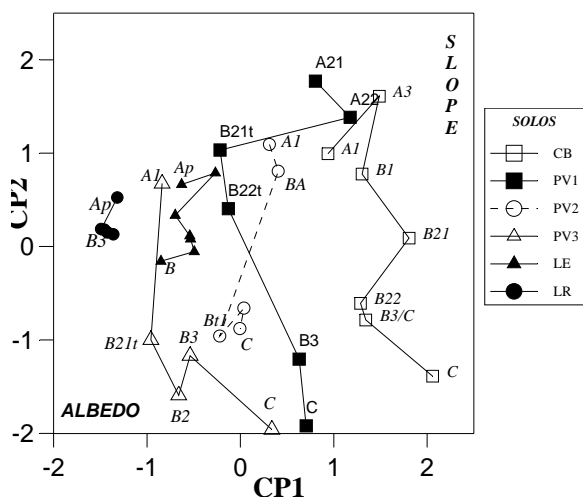
---

*Os autores agradecem ao Dr. Hélio do Prado do Instituto Agrônomo de Campinas (IAC), pelo fornecimento das amostras de solos e dos dados químicos, e ao Laboratório de Radiometria do INPE, onde foram coletados os dados espectrais.*

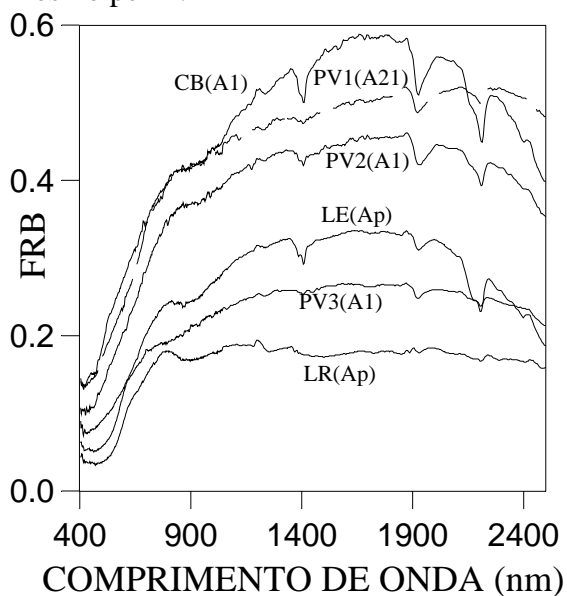
---

## Referências

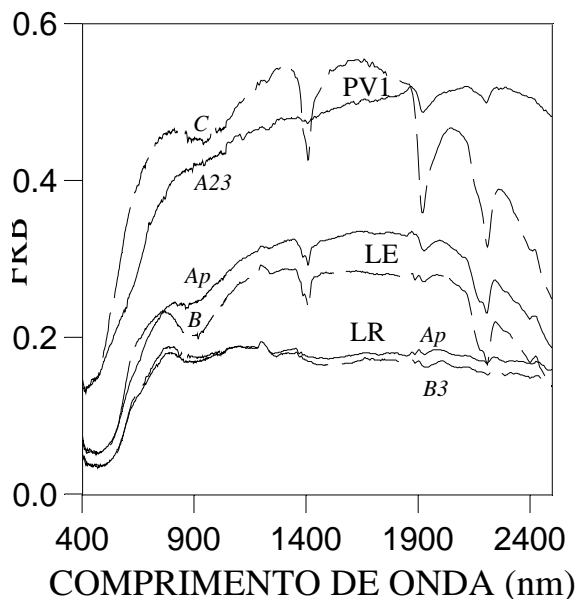
- Bowers, S.A.; Hanks, R.J. Reflection of radiant energy from soils. *Science*, **100**:130-138, 1965.
- Davis, J.C. *Statistics and data analysis in geology*. New York, John Wiley, 1986.
- Galvão, L.S. *Litoestratigrafia de reflectância espectral e uma abordagem quantitativa para análise de espectros*. Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, 1994. 181 p.
- Galvão, L.S.; Vitorello, I. Quantitative approach in the spectral reflectance-lithostratigraphy of the Wind River and southern Bighorn basins, Wyoming. *International Journal of Remote Sensing*, **16**(9):1617-1631, 1995.
- Galvão, L.S.; Vitorello, I.; Paradella, W.R. Spectroradiometric discrimination of laterites with principal components analysis and additive modeling. *Remote Sensing of Environment*, **53**(2):70-75, 1995.
- Henderson, T.L.; Baumgardner, M.F.; Franzmeier, D.P.; Stott, D.E.; Coster, D.C. High dimensional reflectance analysis of soil organic matter. *Soil Science Society American Journal*, **56**:865-872, 1992.
- Madeira Netto, J.S. *Étude quantitative des relations constituants minéralogiques-reflectance diffuse des latosols Brésiliens*. Thèse de Doctorat à l'Université Pierre et Marie Curie, Paris, ORSTOM, 1993. 236 p.
- Mathews, H.L.; Cunningham, R.L.; Petersen, G.W. Spectral reflectance of selected Pennsylvania soils. *Soil Science Society of America*, **37**:421-424, 1973.
- Smith, M.O.; Johnson, P.E.; Adams, J.B. Quantitative determination of minerals types and abundance from reflectance spectral using principal components analysis. *Journal of Geophysical Research*, **90**:C797-C804, 1985.
- Stoner, E.R.; Baumgardner, M.F.; Biehl, L.L.; Robinson, B.F. Atlas of soil reflectance properties. Purdue University, Indiana, LARS, 1980. 110 p.
- Stoner, E.R.; Baumgardner, M.F. Characteristic variations in reflectance of surface soils. *Soil Science Society American Journal*, **45**:1161-1165, 1981.
- Valeriano, M.M.; Epiphanyo, J.C.N.; Formaggio, A.R.; Oliveira, J.B. Bi-directional reflectance factor of 14 soil classes from Brazil. *International Journal of Remote Sensing*, **16**:113-128, 1995.



**Figura 1** - Primeiros dois escores componentes principais para 35 amostras de 6 perfis de solos. Os horizontes amostrados estão indicados. O albedo aumenta da esquerda para a direita do eixo CP1, e razões NIR/VIS tendem a aumentar da base para o topo do eixo CP2 ao longo de um mesmo perfil.



**Figura 2** - Espectros de amostras do horizonte A dos 6 perfis de solos estudados, ilustrando o crescimento do albedo da direita para a esquerda do eixo CP1 da Figura 1. FRB é o Fator de Reflectância Bidirecional.



**Figura 3** - Espectros de amostras dos horizontes superficial (A) e subsuperficial (B ou C) de Latossolo Roxo (LR), Latossolo Vermelho-Escuro (LE) e Podzólico Vermelho-Amarelo de textura arenosa (PV1), ilustrando a variação de declividade das curvas ao longo do eixo CP2 da Figura 1. Espectros do horizonte A (topo de CP2) possuem maiores razões NIR/VIS do que os espectros do horizonte B ou C (base de CP2).