

Discriminação de solos baseada em espectroscopia de reflectância VisNIR

Fabício da Silva Terra¹
José Alexandre Melo Demattê¹
Raphael Viscarra Rossel²

¹ Universidade de São Paulo - USP/ESALQ
Caixa Postal 96 - 13418-260 - Piracicaba - SP, Brasil
terra.fabricio@gmail.com
jamdemat@usp.br

² Australian Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization - CSIRO
Caixa Postal 1666 - 2600 - Camberra - ACT, Austrália
Raphael.Viscarra-Rossel@csiro.au

Abstract. Based on the hypothesis that VisNIR spectra have enough sensibility to differentiate soil samples concerning variations of their physical-chemical and mineralogical attributes, the main aim of this research was to discriminate and cluster soil samples regarding these attribute variations using VisNIR reflectance data and non-supervised classification as clustering analysis. A soil dataset with 1288 samples from the States of Goiás, Mato Grosso do Sul, Minas Gerais e São Paulo was used and granulometric, chemical and mineralogical analyses for soil survey and classification were applied over them. Reflectance data were acquired by the FiledSpec Pro sensor and, after that, transformed by continuum removal. Absorption features were identified. Thereafter, relations between soil attributes and spectral behavior were established by multivariate correlation analysis. Spectral data were submitted to principal component analysis and the resulting scores were clustered by the k-means algorithm. For each resulting cluster, measures of central tendency were obtained for the soil attributes. Besides the variations of reflectance intensity, the soil spectral behavior showed absorption features of the major tropical minerals (2:1 minerals, kaolinite, hematite, goethite and gibbsite), as well as, the contribution of some soil attributes on spectral variations. Regarding the different levels of interaction, only some chemical attributes did not show any relation with soil spectra. Soil samples could be discriminated in 4 clusters based on differences of some attributes and weathering levels due to variations of soil spectra (absorption features and reflectance intensity). VisNIR reflectance spectroscopy shows up as a high potential and applicability technique for qualitative assessment of soils.

Palavras-chave: physical-chemical attributes, weathering, k-means classification, spectral behavior, atributos físico-químicos, intemperismo, classificação k-médias, comportamento espectral.

1. Introdução

De nada adiantam os esforços para o desenvolvimento de práticas agrícolas sustentáveis sem a devida informação do solo, elemento fundamental nesta relação de sustentabilidade. A obtenção de informações referentes aos atributos dos solos e sua distribuição no ambiente obrigatoriamente passa por trabalhos de levantamento e elaboração de mapas em escalas compatíveis aos objetivos requeridos, o que, inevitavelmente, acarreta em um número elevado de amostras de solo coletadas e análises laboratoriais realizadas (Demattê et al., 2004), principalmente considerando o país com uma área cultivada de 65.338.804 ha (IBGE, 2006).

Neste sentido, a espectroscopia de reflectância apresenta alto potencial como tecnologia para otimizar avaliações de solos e seus atributos, mesmo que de forma prévia, pois dispensam o preparo específico das amostras e o uso de reagentes, podendo atender uma maior demanda amostral com maior rapidez e de forma mais econômica que as técnicas convencionais (Viscarra Rossel et al., 2006). Dentro deste contexto, as bibliotecas espectrais que integram resultados de espectroscopia de reflectância aos de análises convencionais na forma de bancos de dados podem servir como base para avaliações qualitativas e quantitativas nas diferentes áreas da ciência do solo. Entretanto, aplicações de espectroscopia de reflectância como ferramenta para estudos pedológicos, trabalhos de levantamento,

mapeamento e classificação dos solos ainda são incipientes e carecem de mais estudos neste sentido (Demattê et al., 2004).

Considerando que variações na granulometria e nos constituintes químicos e mineralógicos dos solos afetam seu comportamento espectral (Baumgardner et al., 1985), nesse sentido, a hipótese do trabalho é que dados de reflectância VisNIR apresentam sensibilidade suficiente para distinguir amostras de solos considerando tais variações. Sendo assim, os objetivos do trabalho foram: a) caracterizar o efeito dos atributos físicos, químicos e mineralógicos no comportamento espectral do solo de 350 e 2500 nm; e, principalmente, b) discriminar e agrupar amostras de solo, considerando as variações desses atributos, utilizando valores de reflectância e classificação não supervisionada como análise de agrupamento.

2. Metodologia de Trabalho

Foram utilizadas 1288 amostras de solos provenientes de 458 perfis distribuídos entre os Estados de São Paulo, Mato Grosso do Sul, Goiás e Minas Gerais. As amostras compõem a base de dados de solo do “Laboratório de Sensoriamento Remoto e Geoprocessamento Aplicados a Solos e Uso da Terra” do Departamento de Ciência do Solo (LSO/ESALQ/ USP). Além das análises de solo, no banco de dados constam também localização geográfica (coordenadas) e informações de clima, geologia e relevo dos locais amostrados.

2.1 Análises físico-químicas e mineralógicas

As amostras de solo foram secas em estufa (45°C por 48 horas), pesadas, destorroadas e peneiradas. As frações menores que 2 mm foram destinadas às análises físico-química, mineralógica (algumas representativas) e espectral (espectroscopia de reflectância VisNIR). As análises químicas incluíram: determinação do pH em H₂O; bases trocáveis (Ca⁺⁺, Mg⁺⁺, K⁺); alumínio trocável (Al³⁺); acidez potencial (H⁺ + Al³⁺); carbono orgânico (CO); e teores de óxidos (SiO₂, Fe₂O₃, Al₂O₃) por ataque sulfúrico. Os seguintes atributos foram calculados: soma de bases (SB = Ca + Mg + K); capacidade de troca de cátions (CTC = SB + [H + Al]); saturação por bases (V% = [SB / CTC] . 100); saturação por alumínio (m% = Al / [Al + SB] . 100); atividade de argila (T = [CTC . 1000] / g.kg⁻¹ de argila); matéria orgânica (MO = CO . 1,725); e índices ki (1,7 . SiO₂ / Al₂O₃) e kr (1,7 . SiO₂ / [Al₂O₃ + (Fe₂O₃ . 0,64)]) (Camargo et al., 2009). Na granulometria foi usado o método do densímetro para separação das frações areia total, silte e argila, utilizando hexametáfosfato de cálcio (0,1N) e hidróxido de sódio (0,1N) como agentes dispersantes (Camargo et al., 2009). Difração de Raio-X (DR-X) foi utilizada na análise e identificação dos minerais da fração argila com metodologia e interpretação descritas por Resende et al. (2005).

2.2 Análise espectral VisNIR (350 a 2500 nm)

Os dados de reflectância bidirecional (ou fator de reflectância bidirecional) foram obtidos com o sensor *FieldSpec Pro (Analytical Spectral Device, Boulder, Colo.)* posicionado verticalmente a 8 cm da amostra de solo, contida em placa de petri, e com campo de visada (FOV) de 18° detectando a energia refletida proveniente de uma área de 2 cm². Como fontes de iluminação foram utilizadas duas lâmpadas halógenas de 50 W, posicionadas a 35 cm da amostra e com um ângulo zenital de 30°. Uma placa *Spectralon* (sulfato de bário) com 100 % de reflectância foi usada como padrão de referência. A calibração do equipamento foi realizada a cada 20 min ou 20 amostras. Os valores de reflectância foram calculados através da Equação 1:

$$FRB() = (L_{\text{solo}}(\lambda)/L_{\text{placa}}(\lambda)).FCA(\lambda) \quad (1)$$

Onde: L_{solo} é a radiância espectral do solo, L_{placa} é a radiância espectral da placa de referência (*Spectralon* ≈ 100 %), FCA é o fator de calibração absoluta da placa (FCA = 1) e λ é o comprimento de onda.

2.3 Procedimento metodológico aplicado

Foram aplicadas estatística descritiva e análise de correlação multivariada ($\alpha = 5\%$) nos resultados físico-químicos para entender, respectivamente, a distribuição e natureza das variações entre esses dados. Nos valores de reflectância foi aplicado o algoritmo de remoção do espectro contínuo (RC). A representação do comportamento espectral médio (associado ao desvio padrão) das amostras de solo foi obtida sem e com RC para facilitar a visualização das variações na intensidade de reflectância e a identificação das feições de absorção dos espectros. Análise de correlação multivariada ($\alpha = 5\%$) também foi aplicada entre os dados de reflectância com RC e os dados químicos e granulométricos normalizados (\log_{10} , raiz quadrada e boc-cox) para avaliar a influência desses atributos no comportamento espectral dos solos. Análise por componentes principais (APC) foi utilizada nos dados espectrais transformados (com RC) para reduzir a dimensionalidade das variáveis e visualizar as estruturas e padrões de distribuição das informações. Para a identificação dos agrupamentos, os 10 primeiros escores da ACP foram submetidos à análise de clusterização através do algoritmo de classificação não-supervisionada k-médias. O número adequado de grupos foi definido com base no gráfico de silhueta (*silhouette plot*). Para fins de comparação, medidas de tendência central (mediana, quartis, máximo, mínimo e *outliers*) foram obtidas através de gráficos *boxplot* para os atributos físico-químicos mais representativos por grupo formado.

3. Resultados e Discussão

3.1 Caracterização das amostras

O conjunto total das amostras de solo apresentou classificação textural argilosa, com conteúdo média de argila de 44,44 % (desvio padrão/DP: 25,04 %), com atividade de argila baixa (média: 143,60 mmolc.kg⁻¹ e DP: 100,10 mmolc.kg⁻¹), caráter mesodistrófico com baixa saturação por bases (média: 40,70 % e DP: 24,10 %), baixa saturação por alumínio (média: 24,90 % e DP: 28,70 %) e moderadamente ácidos considerando a média dos valores de pH H₂O na reação do solo (média: 5,40 e DP: 0,70) (EMBRAPA, 2006). Com relação aos teores de óxidos de ferro, o conjunto de amostras foi classificado como mesoférrico (média: 15,78 % e DP: 10,59 %) e com mineralogia caulínica predominante de acordo com os valores de ki (média: 1,40 e DP: 0,44) e kr (média: 0,95 e DP: 0,36) (EMBRAPA, 2006). Os valores médios de CO e MO foram, respectivamente 8,80 g.kg⁻¹ (DP: 5,60 g.kg⁻¹) e 15,20 g.kg⁻¹ (DP: 9,70 g.kg⁻¹). Os principais minerais encontrados pela análise DR-X foram: A) anatásio, anfibólio, feldspato, ilmenita, olivina, piroxênio, quartzo e rutilo (minerais das frações areia e silte); B) caulinita (mineral 1:1); C) esmectita, mica (ilita) e vermiculita VHE (minerais 2:1); D) coríndon e gibsita (óxidos de alumínio); e E) ferrihidrita, goethita, hematita, lepidocrocita e magnetita (óxidos de ferro) (Resende et al., 2005), corroborando com os valores médios de ki e kr encontrados.

3.2 Comportamento espectral

Na faixa do visível (350 a 700 nm) ao infravermelho próximo (700 a 1100 nm), o espectro médio apresentou inclinação ascendente e pronunciada de 350 até, aproximadamente, 750 nm, no entanto, entre 750 e 2100 nm o grau de inclinação foi reduzido tendendo a linearidade (Figura 1a). A partir de 2100 nm, o comportamento espectral médio apresentou inclinação descendente variando de pronunciada à retilínea. Conforme variações dos solos, outros aspectos importantes foram considerados: alterações na intensidade de reflectância (albedo) ao longo de todo espectro e mudanças na amplitude e o formato das feições de absorção (Figura 1a). As variações encontradas no comportamento espectral médio das amostras de solo estão em concordância com os resultados Demattê et al. (2004).

Foram observadas 14 feições de absorção relacionadas aos grupos funcionais dos solos, sendo elas: A) devido à transição eletrônica nos óxidos de ferro (hematita e goethita) de 425 a 1000 nm (Sherman e Waite, 1985); B) devido à vibração não-fundamental (VNF) no radical hidroxila (O-H) presente na estrutura dos argilominerais 2:1 e 1:1 em 1414 e 1917 nm, e, também, especificamente em 1414 nm, devido à hidroxila das moléculas estruturais de água dos minerais 2:1; C) devido à VNF no grupo aluminol (Al-OH) dos argilominerais 2:1 e 1:1 em 2205, 2355 (prioritariamente mica/ilita) e 2448 nm (prioritariamente mica/ilita), e dos hidróxidos de alumínio (gibbsite) em 2260 nm (Hunt e Salisbury, 1970) (Figura 1b).

3.3 Relação atributo-espectro

Os atributos granulométricos, especificamente areia e argila, apresentaram relações significativas contínuas e crescentes com o espectro a partir de, aproximadamente, 1870 até 2500 nm (Figura 1c) influenciando dessa forma as variações de intensidade de reflectância nesta faixa especificada. Relações semelhantes foram observadas com o espectro transformado (RC) na faixa do visível, de 360 a 390 nm, e do infravermelho, de 790 a 1890, e, após isso, relações de menor significância entre feições de absorção até o final do espectro (Figura 1d). Pelas relações observadas inferiu-se que o incremento de argila induziu a uma redução na intensidade de reflectância dos espectros, sendo inverso o comportamento espectral com o incremento de areia. As correlações encontradas entre argila e os picos de absorção de 840 a 1414 nm foram atribuídas ao aumento dos óxidos de ferro e argilominerais devido ao incremento da argila nos solos. O silte apresentou relações inversas com o espectro a partir de 1090 nm e, preferencialmente, entre feições de absorção sendo os maiores coeficientes de correlação inversa entre, aproximadamente, 2010 e 2090 nm (Figura 1d).

Os conteúdos de CO e MO apresentaram relações inversas com o aumento na intensidade de reflectância dos espectros de forma geral, sem pontos específicos, ao redor de 610 nm as quais se intensificaram a partir 2110 nm (Figura 1c). Relações semelhantes aos conteúdos orgânicos foram observadas para H + Al a partir de 2180 nm e para CTC a partir de 2300 nm (Figura 1c), muito provavelmente devido ao efeito dos conteúdos orgânicos na acidez potencial do solo indicado pela correlação de 0,87 entre esses e, também pela contribuição da acidez na CTC do solo tendo em vista o coeficiente de correlação de 0,88 entre ambos. A atividade de argila do solo apresentou coeficientes de correlação positivos com o espectro na faixa espectral de atuação dos óxidos de ferro (Figura 1b), ou seja, entre os comprimentos de onda de 360 a 560 nm e de 790 a 1020 nm (Figura 1d), inclusive, com correlações positivas significativas em todas as feições atribuídas a esses óxidos, exceto em 650 nm (Figura 1d). Tal comportamento foi atribuído ao aumento da mineralogia oxídica, que induz a redução do espectro nessas faixas, em detrimento da mineralogia 2:1 na fração argila do solo que provoca o aumento de carga no solo e eleva o valor de T (Azevedo e Vidal-Torrado, 2009).

Os óxidos de Al, Fe e, por consequência, o índice kr apresentaram comportamento semelhante considerando suas correlações contínuas, crescentes e intensas com os valores de reflectância ao longo de todo o espectro (Figura 1c). O SiO₂ e índice ki apresentaram as mesmas relações, porém, com menor intensidade (Figura 1c). Esses resultados encontram-se em concordância com os obtidos por Galvão et al. (2001). O incremento dos óxidos analisados e a consequente redução no valor dos índices ki e kr indicaram uma atenuação na intensidade de reflectância dos espectros de 350 a 2500 conforme avanço no grau de intemperismo dos solos a medida que a mineralogia se altera de caulínica/oxídica para oxídica e, finalmente para oxídica/gibítica (Kämpf et al., 2009). As correlações entre esses mesmos atributos e os valores de reflectância com RC indicaram o mesmo padrão de influência no espectro, no entanto, mais concentrada nas feições de absorção e em suas proximidades (Figura 1d) conduzindo o comportamento espectral a um aspecto retilíneo com feições de absorção intensamente atenuadas na medida em que o solo torna-se intemperizado.

A tendência de atenuação na feição centrada em 1414 nm deu-se pela redução espectral nas faixas que antecedem e sucedem esse pico já que nessa posição os valores de reflectância não se mostraram afetados pela variação dos atributos (Figura 1d). Da mesma forma, o Al_2O_3 , Fe_2O_3 e o índice kr apresentaram correlações de maior intensidade que o SiO_2 e o índice ki (Figura 1d).

Os demais atributos avaliados não apresentaram relações significativas de primeira ordem (diretas/primárias) com o comportamento espectral do solo (Figuras 1c e 1d). No entanto, alguns desses apresentaram relações de segunda ordem (indiretas/secundárias) com o espectro já que se correlacionaram significativamente com atributos de primeira ordem. Foram esses: Ca [Fe_2O_3 (0,45)]; Al^{3+} [conteúdos orgânicos (0,68), H+Al (0,89), CTC (0,73), T (0,57), Fe_2O_3 (-0,50) e kr (0,42)]; V% [conteúdos orgânicos (-0,51), H+Al (-0,62) e Fe_2O_3 (0,43)]; m% [conteúdos orgânicos (0,52), H+Al (0,71), CTC (0,44), T (0,51), Fe_2O_3 (-0,57) e kr (0,45)] e pH [conteúdos orgânicos (-0,45), H+Al (-0,53), T (-0,40) e Fe_2O_3 (0,50)]. Ainda, outros atributos apresentaram relações indiretas de terceira ordem com o espectro tendo em vista suas correlações significativas com atributos de segunda ordem. Foram esses: Mg [Ca (0,82), V% (0,72), pH (0,64)] e SB [Ca (0,96), V% (0,85), m% (-0,55), pH (0,72)]. Apenas o potássio não apresentou nenhuma forma de relação com o comportamento espectral.

3.4 Discriminação e agrupamento

Através na classificação k-médias dos escores resultantes da ACP, as amostras de solo puderam ser adequadamente discriminadas em quatro grupos (Figura 1a) de acordo com uma amplitude média de silhueta de 0,33 (Figura 2b). Com base no comportamento espectral médio de cada agrupamento, processado com RC (Figura 2c) e sem (Figura 2d), observou-se uma tendência de distribuição dos grupos considerando principalmente as variações de intensidade, formato e posicionamento das feições de absorção, além de variações de albedo.

O grupo 1 apresentou comportamento espectral médio com feições de absorção da goethita bem característicos e intensos em 425 e 480 nm, e, de menor intensidade, em 650 nm. A provável predominância desse óxido de Fe, sobre a hematita, produziu um deslocamento típico para a direita da feição originalmente em 903 nm para 940 nm (Figura 2c). O espectro médio desse grupo também apresentou feições bem pronunciadas e intensas em 1414, 1917 nm atribuídas à hidroxila dos argilominerais, assim como em 2205 nm, atribuída ao Al-OH dos mesmos. O conjunto dessas três feições muito amplas e intensas sugeriu a predominância de minerais 2:1 sobre os 1:1. Ainda, feições atribuídas ao aluminol da mica/ilita também foram observadas em 2355 e 2448 nm (Figura 2c). A distribuição e formato das feições de absorção do espectro médio, assim como os minerais relacionados a essas feições, além do alto valor de intensidade de reflectância (Figura 2d), sugeriram a formação do grupo 1 com base nos solos sob processo pedogenéticos incipientes e com reduzido conteúdo de argila. O conteúdo de argila seguido dos maiores valores de T e do índice kr, relacionados à mineralogia 2:1, observados no agrupamento 1 (Figura 3) ratificaram esta tendência. Esse grupo também apresentou o segundo maior conteúdo de CO.

No espectro médio do grupo 2, as feições de absorção da goethita foram consideravelmente reduzidas dando lugar à feições da hematita em 513 e 840 nm, sendo essa última resultante do deslocamento lateral para esquerda do pico original em 903 nm dado o predomínio da hematita sobre a goethita (Figura 2c). A feição de absorção em 1414 nm foi quase eliminada, tendo em vista a provável redução dos minerais 2:1 quando comparada ao grupo 1. Da mesma forma, essa redução foi evidenciada nas feições de 1917 e 2205 nm cuja permanência pode ser atribuída aos grupos OH e Al-OH da caulinita (Figura 2c). A feição de absorção do grupo aluminol da gibsitita em 2260 nm foi evidenciado, porém com menor intensidade (Figura 2c). A distribuição e intensidade das feições de absorção associadas à baixa intensidade de reflectância ao longo do espectro (Figura 2d) sugeriu o estágio avançado

nos processos pedogenéticos das amostras que compuseram o grupo 2. Os maiores valores observados de argila e acidez potencial seguidos pelos menores valores de kr e atividade de argila corroboraram com a indicação de estágio de intemperismo avançado (Figura 3). Além disso, esse grupo também apresentou o maior conteúdo de CO, e, por consequência, de CTC dada a correlação entre ambos ($r: 0,75$).

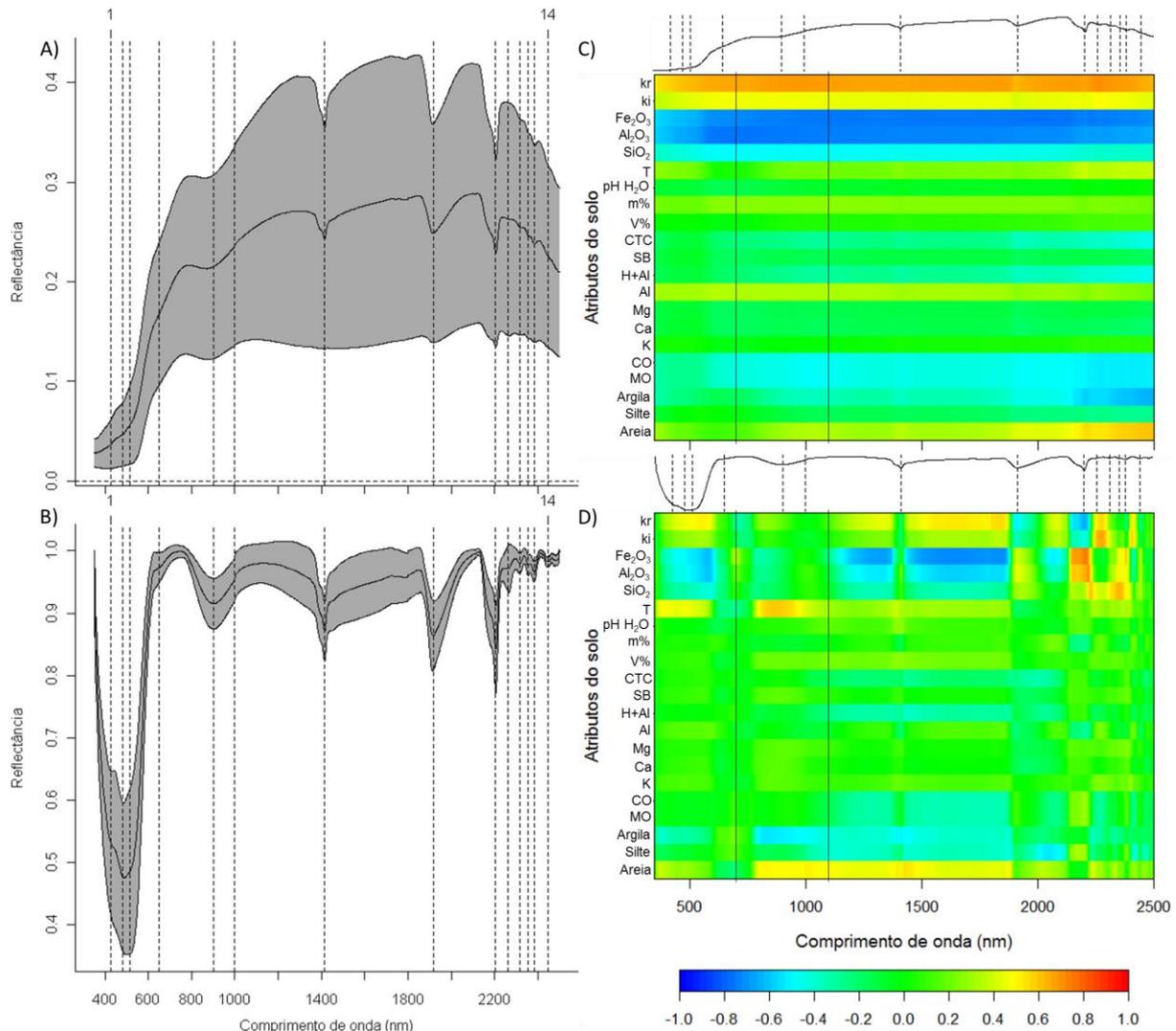


Figura 1. Comportamento espectral médio (sem e com RC) das amostras de solo e correlações ao longo do espectro (sem e com RC).

Nos espectros médios dos grupos 3 e 4 foram observadas feições de absorção, principalmente de 1414 a 2205 nm, de intensidades e tamanhos intermediários quando comparadas às dos grupos 1 e 2 (Figura 2c), no entanto, tendendo a diminuição do grupo 3 ao 4, porém, mantendo uma distribuição similar no conteúdo dos argilominerais 2:1 e 1:1 entre ambos agrupamentos. Pela análise das feições dos óxidos de Fe, uma mudança gradual foi observada do grupo 3 ao 4, onde as feições da goethita centradas em 425 e 480 nm tenderam a diminuir de intensidade e a feição da hematita centrada em 513 nm começou a se formar (Figura 2c). No mesmo sentido do grupo 3 ao 4, a transição da feição da goethita em 940 nm (mais predominante no grupo 4) para a feição da hematita em 850 nm foi observada com um pico resultante próximo à 903 nm indicando a presença conjunta dos dois óxido de Fe nas amostras de solo (Figura 2c). O conjunto de alterações espectrais mencionadas, associadas às intensidades de reflectância de cada grupo (figura 2d), tornou espectro médio do grupo 3 mais

próximo ao 1, e o comportamento espectral médio do grupo 4 mais próximo ao do 2 (Figura 2c), situando esses agrupamentos numa posição intermediária em relação ao comportamento espectral e aos níveis de intemperismo. As medidas de tendência central dos atributos desses agrupamentos confirmaram tais observações, principalmente os valores de argila, índice kr e T (Figura 3). Os menores valores de CTC e H+Al foram atribuídos aos menores conteúdos de CO desses grupos Tendo em vista a correlação entre esses elementos.

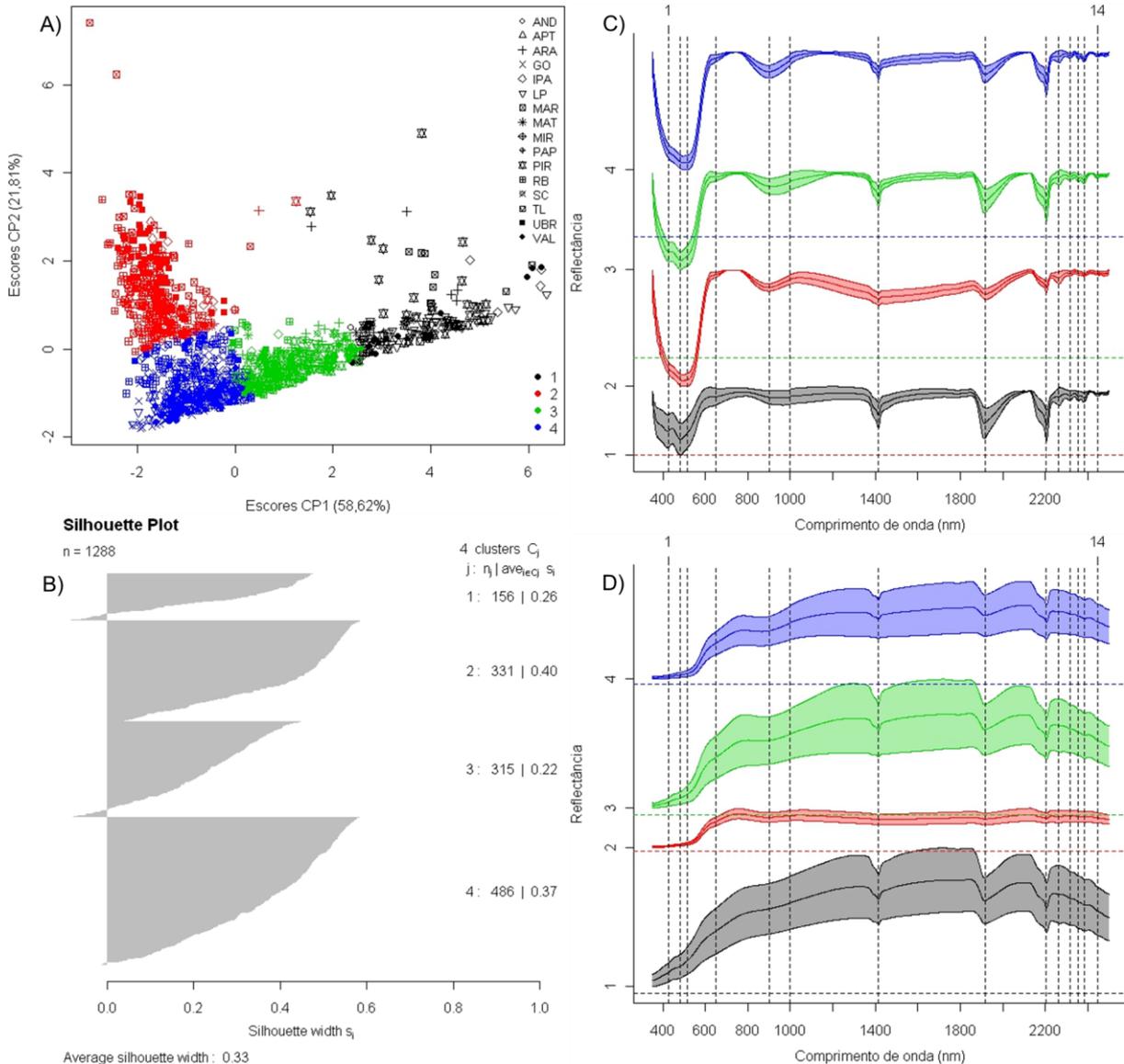


Figura 2. Agrupamento dos escores ACP; gráfico de silhueta e comportamento espectral médio por grupo formado (com e sem RC).

4. Conclusões

A partir dos resultados obtidos pode-se concluir que: A) a hipótese do trabalho foi comprovada; B) a representação das relações entre atributos e reflectância ao longo do espectro possibilita localizar e inferir sobre a magnitude e a forma dessas relações; C) Considerando os diferentes níveis de interação com o espectro, apenas o potássio não apresenta nenhuma relação; D) É possível diferenciar e classificar amostras de solo com base no espectro VisNIR considerando variações de seus atributos e nível de intemperismo; E) amostras em estágio avançado de intemperismo apresentam comportamento espectral de baixa intensidade, aspecto retilíneo e com feições de absorção intensamente reduzidas, apesar do aumento no conteúdo

dos óxidos de Fe e Al; F) a espectroscopia de reflectância VisNIR apresenta-se como uma técnica de alta potencialidade e aplicabilidade na avaliação qualitativa dos solos.

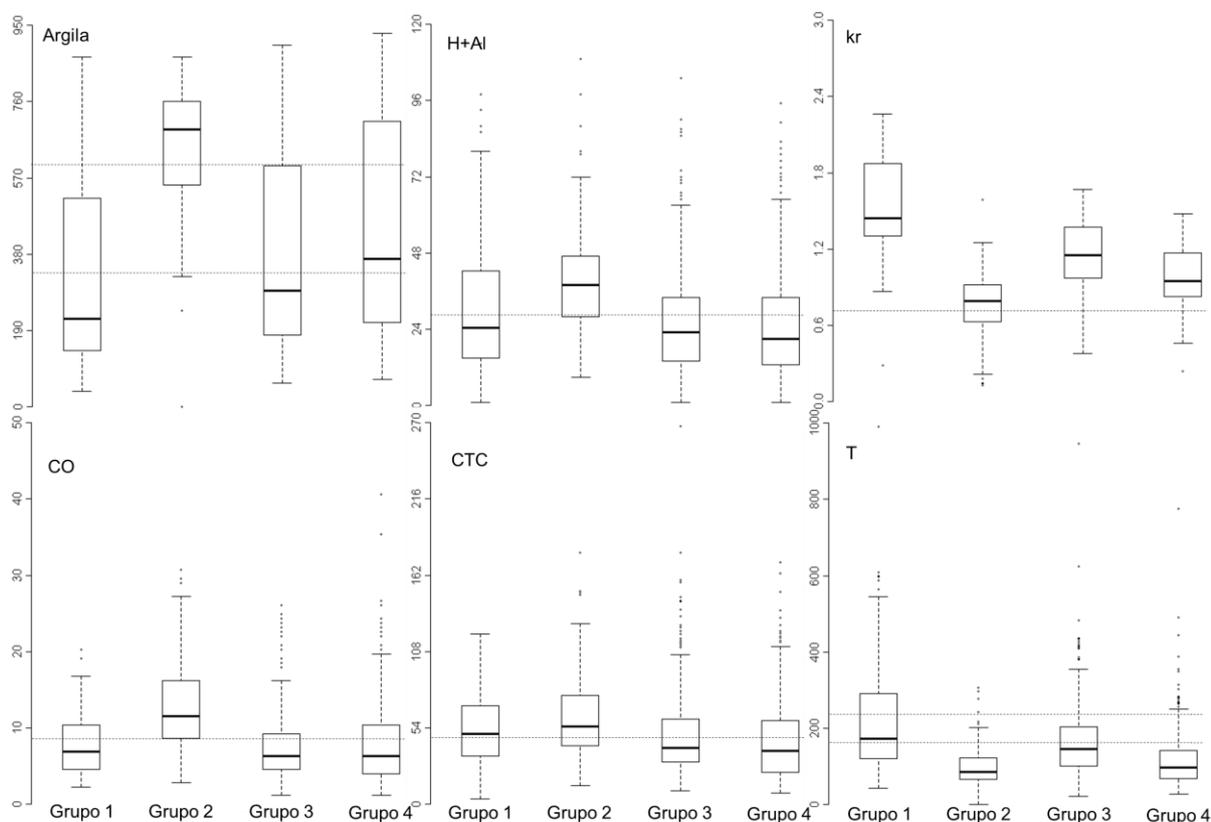


Figura 3. Medidas de tendência central por atributo para cada agrupamento.

Referências Bibliográficas

- Azevedo, A.C.; Vidal-Torrado, P. Esmeclita, vermiculita, minerais com hidróxi entrecamadas e clorita. In: Melo, V.F.; Alleoni, L.R.F. (Ed.). **Química e mineralogia do solo: Parte I - Conceitos básicos**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2009. cap. 6, p. 381-426.
- Baumgardner, M.F.; Silva, L.F.; Biehl, L.L.; Stoner, E.R. Reflectance properties of soils. **Advances in Agronomy**, v. 38, p. 1-43, 1985.
- Camargo, O.A.; Moniz, A.C.; Jorge, J.A.; Valadares, J.M. **Métodos de análise química, mineralógica e física de solos do IAC**. Campinas: Instituto Agrônomo de Campinas, 2009. 77 p. (IAC. Boletim Técnico, 106).
- Demattê, J.A.M.; Campos, R.C.; Alves, M.C.; Fiorio, P.R.; Nanni, M.R. Visible-NIR reflectance: a new approach on soil evaluation. **Geoderma**, v. 121, p. 59-112, 2004
- Embrapa. Centro Nacional de Pesquisas de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Brasília: Embrapa-SPI; Rio de Janeiro: Embrapa-CNPq, 2006. 306 p.
- Galvão, L.S.; Pizarro, M.A.; Epiphanyo, J.C.N. Variations in reflectance of tropical soils: spectral-chemical compositions relationships from AVIRIS data. **Remote Sensing of Environment**, v. 75, p. 245-255, 2001.
- Hunt, G.R.; Salisbury, J.W. Visible and near-infrared spectra of minerals and rocks: I silicate minerals. **Modern Geology**, v. 1, p. 283-300, 1970.
- IBGE. **Censo agropecuário 2006**. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br>>. Acesso em: 16 fev. 2010.
- Kämpf, N.; Curi, N.; Marques, J.J. Intemperismo e ocorrência de minerais no ambiente do solo. In: Melo, V.F.; Alleoni, L.R.F. (Ed.). **Química e mineralogia do solo: Parte I - Conceitos básicos**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2009. cap. 5, p. 334-379.
- Viscarra Rossel, R.A.; Walvoort, D.J.J.; McBratney, A.B.; Janik, L.J.; Skjemstad, J.O. Visible, near infrared, mid infrared or combined diffuse reflectance spectroscopy for simultaneous assessment of various soil properties. **Geoderma**, v. 131, p. 59-75, 2006.
- Resende, M.; Curi, N.; Ker, J.C.; Rezende, S.B. **Mineralogia de solos brasileiros: interpretações e aplicações**. Lavras: UFLA, 2005. 192 p.
- Sherman, D.M.; Waite, T.D. Electronic spectra of Fe⁺³ oxides and oxide hydroxides in the near IR to near UV. **American Mineralogist**, v. 70, p. 1296-1269, 1985.