

Comissão 1.3 - Pedometria

ESPECTROS VIS-NIR DO SOLO E *FUZZY* K-MÉDIAS APLICADOS NA DELIMITAÇÃO DE UNIDADES DE MAPEAMENTO DE SOLOS EM TOPOSSEQUÊNCIAS

Rodnei Rizzo⁽¹⁾, José A.M. Demattê^{(2)*} e Marilusa Pinto Coelho Lacerda⁽³⁾

⁽¹⁾ Universidade de São Paulo, Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Laboratório de Análise Ambiental e Geoprocessamento, Piracicaba, São Paulo, Brasil.

⁽²⁾ Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Departamento de Ciência do Solo, Piracicaba, São Paulo, Brasil.

⁽³⁾ Universidade de Brasília, Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, *Campus* Universitário Darcy Ribeiro, Brasília, Distrito Federal, Brasil.

* Autor correspondente.

E-mail: jamdemat@usp.br

RESUMO

O conhecimento dos solos é cada vez mais importante para que o uso dele seja realizado corretamente na agropecuária, no crescimento urbano, na conservação dos recursos naturais, entre outros. Entretanto, verifica-se carência de profissionais qualificados para a caracterização e os mapeamentos pedológicos, particularmente em escalas de maior detalhamento. Essa carência, aliada aos avanços das ferramentas computacionais e do sensoriamento remoto, promoveu o surgimento do Mapeamento Digital de Solos (MDS), que busca auxiliar e agilizar as atividades de levantamento pedológico. Assim, este trabalho objetivou desenvolver uma metodologia de delimitação de unidades de solos em topossequências por meio do comportamento espectral dos solos no comprimento de onda do Visível-Infravermelho Próximo (Vis-NIR). A metodologia espectral consistiu na obtenção das curvas espectrais dos solos por meio do espectrorradiômetro *FieldSpec Pro* e da redução do número de informações espectrais por meio da análise de Componentes Principais, seguida de agrupamento das amostras mediante método *fuzzy* k-médias. Foram selecionadas cinco topossequências com pontos equidistantes de 30 m para caracterizar as classes de solos e amostragens. Foram descritas oito classes de solos distintas, que tiveram caracterização detalhada e classificação em perfis pedológicos. No restante dos pontos, a caracterização das classes de solos foi feita com base na classificação dos solos realizada nos perfis pedológicos, com coleta de amostras por meio de tradagens nas profundidades de 0,00-0,20 e 0,80-1,00 m, perfazendo o total de 162 amostras ao longo das cinco topossequências. As amostras foram

Recebido para publicação em 27 de outubro de 2014 e aprovado em 6 de julho de 2015.

DOI: 10.1590/01000683rbc20140694

analisadas pelas metodologias convencional e espectral, para que os resultados pudessem ser comparados e avaliados. Dessa forma, foram realizadas análises morfológicas, físicas (textura) e químicas nas amostras de solo. Das cinco topossequências estudadas, os resultados foram satisfatoriamente semelhantes; alguns solos não foram perfeitamente individualizados pela metodologia espectral, em razão da grande semelhança em seus comportamentos espectrais, como demonstrado pelo Latossolo Vermelho Férrico e Nitossolo Vermelho Férrico. A metodologia espectral foi capaz de diferenciar solos com resposta espectral distinta e estabelecer limites nas topossequências, apresentando grande potencial para ser implementada em levantamentos pedológicos.

Palavras-chave: sensoriamento remoto, espectroscopia de solos, topossequências, comportamento espectral.

ABSTRACT: SOIL VIS-NIR SPECTRA AND FUZZY K-MEANS ON DEFINITION OF SOIL MAPPING UNITS IN TOPOSEQUENCES

Knowledge of soils is increasingly important for their correct use in agriculture, in urban growth, and in conservation of natural resources, among other purposes. However, there is a lack of qualified professionals for pedological characterization and mapping, particularly at scales of greater detail. Due to this shortage and due to advances in computational tools and remote sensing, Digital Soil Mapping (DSM) arose in order to assist and expedite pedological survey activities. Thus, the aim of this study was to develop a method for delineation of soil units in toposequences through the spectral response of soils in the Vis-NIR (Visible-Near Infrared) wavelength. The spectral method consisted of obtaining soil spectral curves by means of a spectroradiometer, FieldSpec Pro, and reduction in the amount of spectral information by Principal Component Analysis, followed by clustering of samples by the fuzzy k-means method. Five toposequences with 30 m equidistant points were selected for soil class characterization and sampling. Eight distinct soil classes were identified and received detailed characterization and classification in pedological profiles. For the remaining points, the characterization of soil classes was based on the soil classification contained in the pedological profiles, with samples collected using a soil auger at depths of 0.00-0.20 and 0.80-1.00 m, for a total of 162 samples across the five toposequences. The samples were analyzed by the conventional and spectral method so that the results could be compared and evaluated. Thus, morphological, physical (texture), and chemical analyses of soil samples were made. In the five toposequences studied, the results were similar, and some soils were not perfectly individualized by spectral method, due to great similarity in their spectral curves, as demonstrated by Latossolo Vermelho Férrico and Nitossolo Vermelho Férrico. The spectral method was able to differentiate soils with distinct spectral responses and establish limits in toposequences, showing great potential for implementation in soil surveys.

Keywords: remote sensing, soil spectroscopy, toposequences, spectral behavior.

INTRODUÇÃO

O conhecimento dos solos torna-se cada vez mais necessário, em razão da importância dele na agropecuária, no desenvolvimento urbano, na conservação do meio ambiente, entre outros. No entanto, seu conhecimento e estudo são complexos, visto que apresenta variabilidade vertical e lateral (Bregt et al., 1987). Entre os profissionais mais qualificados para descrever e mapear solos, estão os pedólogos, os quais detêm profundo conhecimento da natureza dos solos, embasado em atividades realizadas no campo, com descrição de perfis, tradagens e interpretações sobre as características da paisagem, para distinguir os solos de acordo com um sistema específico de classificação

(Bregt et al., 1987), para posterior indicação de uso mais adequado.

Apesar da atual demanda por pedólogos, existem poucos no Brasil e também em vários outros países (Oliveira, 1999), além de não haver treinamento em larga escala para aumentar o número desses profissionais. Como consequência, não há adequado avanço nos mapeamentos pedológicos, tendo em vista as dimensões e o potencial agrícola de diversos países (Jacomine, 1999). No Brasil, os mapeamentos existentes são resultado principalmente do Projeto Radam-Brasil, na escala de 1:1.000.000, e o Estado de São Paulo apresenta levantamentos pedológicos na escala de 1:100.000, referentes aos esforços do Instituto Agrônomo de Campinas (IAC) (Oliveira e Prado, 1989).

Em razão dessa carência, surgiu o mapeamento digital de solos (MDS), que durante os últimos 30 anos apresentou avanços em métodos multivariados de classificação, teoria de regionalização variável e ferramentas computacionais, como os sistemas de informações geográficas (SIG) (Burrough et al., 1997). Logo, por meio desses métodos, o pedólogo tem a possibilidade de melhor compreender e modelar a complexa distribuição do solo no espaço. Dentre as ferramentas utilizadas no MDS, está o sensoriamento remoto (Demattê et al., 2004), que se baseia no fato de que os diferentes solos absorvem e refletem a energia eletromagnética em comprimentos de onda distintos, de acordo com seus atributos químicos, físicos e mineralógicos; dessa forma, é possível diferenciá-los (Andronikov e Dobrovolskiy, 1991). O uso da reflectância espectral como técnica para ter acesso aos atributos dos solos mostra-se relevante por causa da sua agilidade e facilidade de obtenção (Viscarra Rossel et al., 2009). Classes de solo foram determinadas a partir de análises qualitativas e quantitativas dos dados espectrais na faixa do visível e infravermelho, cuja técnica desenvolvida foi intitulada “Interpretação múltipla de espectros de reflectância” (IMER), que apresentou resultados satisfatórios, porém indicou a necessidade de mais estudos sobre o tema (Bellinaso, 2010).

Pode-se, então, considerar que é possível diferenciar os solos por meio técnicas de sensoriamento remoto, em particular a espectroscopia de reflectância no Vis-NIR, uma vez que os mesmos apresentam respostas espectrais distintas em função da sua composição química, física e mineralógica. Desta forma, esta metodologia pode ser utilizada para a distinção de classes de solos em topossequências representativas da distribuição de solos de uma região, permitindo compreender e modelar tal distribuição, auxiliando atividades de mapeamento de solos.

Assim, este trabalho teve como principal objetivo desenvolver uma metodologia para delimitar unidades de mapeamento em topossequências da região de Piracicaba, SP, por meio do comportamento espectral dos solos no comprimento de onda do Vis-NIR, visando o auxílio aos levantamentos e mapeamentos pedológicos.

MATERIAL E MÉTODOS

Área de estudo

O estudo foi realizado na região de Piracicaba, São Paulo. A área de estudo localiza-se entre as coordenadas 22° 42' 30" a 22° 43' 27" de latitude sul e 47° 33' 32" a 47° 34' 45" de longitude oeste. Possui aproximadamente 270 ha, onde predominam

Latossolos e Argissolos (Oliveira e Prado, 1989). A litologia encontrada na região corresponde a diabásios da Formação Serra Geral, siltitos argilosos e argilitos da formação Tatuí e argilitos laminados, correspondentes à formação Irati (Almeida e Barbosa, 1953).

Aquisição de dados planialtimétricos e criação de Modelo Numérico do Terreno (MNT)

Os dados planialtimétricos foram obtidos a partir das cartas topográficas do Instituto Geográfico e Cartográfico do Estado de São Paulo (IGC), na escala de 1:10.000, no formato digital, referentes às folhas Piracicaba IV (SF-23-Y-A-IV-2-SE-E) e Vila Tupi (SF-23-Y-A-IV-2-SE-F). Em seguida, as curvas de nível, a hidrografia e os pontos cotados extraídos dessas cartas foram inseridos no *software* ArcGIS (ESRI, 2006), onde foram convertidos para o formato vetorial e, foi gerado o Modelo Numérico do Terreno (MNT) (Hutchinson, 1993). O MNT foi gerado para verificar as feições de relevo e distribuição dos solos da área estudada, como classes de hipsometria e declividade, para auxiliar na seleção dos caminhamentos das topossequências e escolha dos pontos para abertura de perfis completos de solos representativos para o estudo, visto que as variações nas classes de declividade controlam a variação de classes de solos.

Foram selecionadas cinco topossequências denominadas de A, B, C, D, e E (Figura 1), definidas com base no MNT gerado, fotografias aéreas na escala 1:35.000 (Base..., 2008) e mapa de solos existente (Oliveira e Prado, 1989).

Delimitação de solos nas topossequências

Nas topossequências selecionadas, foram definidos pontos equidistantes de 30 m para caracterização das classes de solos e amostragens. Esses pontos foram georreferenciados no sistema GPS-PRO-XR submétrico. Posteriormente, os pontos e o caminhamento das topossequências foram digitalizados no programa ArcGis (ESRI, 2006). Foram abertos perfis nos pontos pré-selecionados das topossequências para caracterização detalhada e classificação das classes de solo de ocorrência, com coleta de amostras dos horizontes A e horizonte B ou C destinadas às análises laboratoriais. No restante dos pontos, a caracterização das classes de solos foi feita com base na caracterização morfológica e classificação dos solos avaliados nos perfis pedológicos, com coleta de amostras por meio de tradagens nas profundidades de 0,00-0,20 e 0,80-1,00 m, perfazendo o total de 162 amostras ao longo das cinco topossequências. Os perfis foram realizados em cortes de estradas.

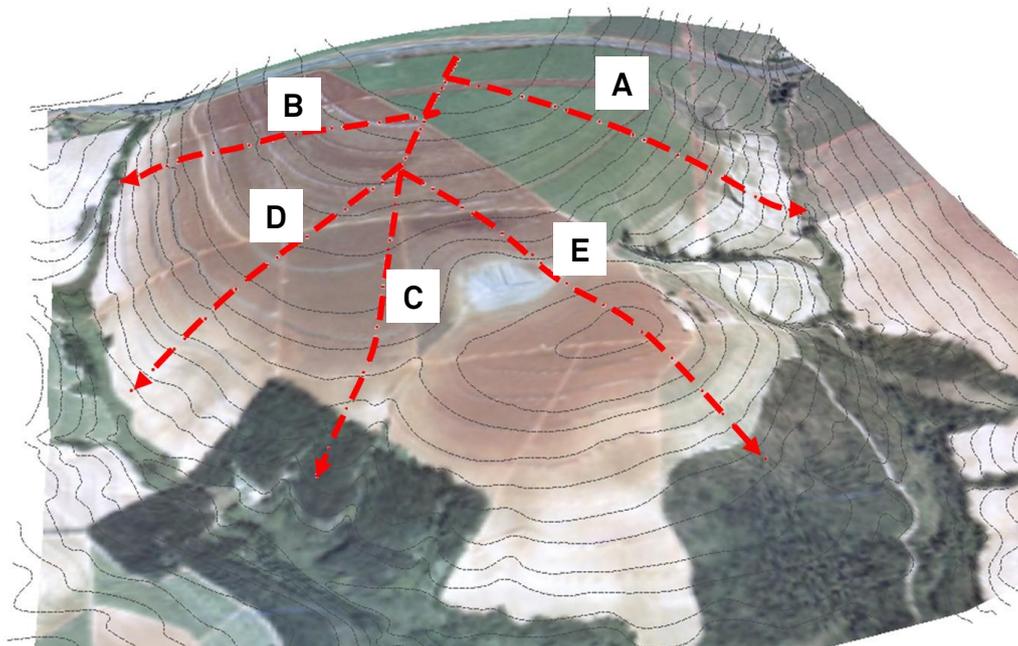


Figura 1. Localização das topossequências A, B, C, D e E na área de estudo.

Obtenção das unidades de mapeamento mediante método convencional

Os perfis de solos representativos das oito classes de solos de ocorrência ao longo das topossequências foram caracterizados com descrição morfológica completa, de acordo com Santos et al. (2013). Em seguida, as amostras coletadas nos perfis e nas tradagens foram encaminhadas para análises laboratoriais. Foram feitas análises químicas e físicas complementares à classificação dos solos. A caracterização dos solos, associada às observações de campo dos perfis de solo estudados, permitiu o estabelecimento das unidades de mapeamento e suas respectivas classes de solo, de acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação dos Solos - SiBCS (Embrapa, 2013), em cada topossequência.

Análises laboratoriais

As amostras foram secas em estufa a 50 °C por 48 h e peneiradas, sendo as frações menores que 2 mm (Terra Fina Seca ao Ar - TFSA) utilizadas para as análises laboratoriais. Os teores de areia, silte e argila foram determinados, pelo método do densímetro (Camargo et al., 1986). Para as análises químicas, foram determinados o pH em água e KCl, Ca^{2+} , Mg^{2+} , Al^{3+} , H+Al e matéria orgânica (MO), de acordo com Raij et al. (2001). Em seguida, com base nos dados anteriormente citados, calcularam-se a soma de bases (SB), capacidade de troca catiônica (CTC), saturação por bases (V) e saturação por Al (m). A cor das amostras úmidas foi obtida utilizando-se um

colorímetro Minolta CR-300, com *chip* para cor de Munsell (Campos et al., 2003). O caráter férrico foi determinado pela forte atração pelo ímã.

Obtenção das curvas espectrais

As amostras de solos coletadas na etapa anterior, foram encaminhadas ao laboratório para obtenção das suas respectivas curvas espectrais. Os dados espectrais dos solos foram obtidos com o espectrômetro *FieldSpec Pro (Analytical Spectral Devices, Boulder, Colorado, USA)*. Tal equipamento é constituído por uma fibra ótica, realizando leituras no intervalo entre 350 e 2500 nm. A geometria do sistema baseia-se no posicionamento perpendicular do sensor em relação à amostra, mantendo entre ambos uma distância de 0,27 m. A fonte de iluminação foi posicionada a 0,61 m da amostra, formando um ângulo de 20° com o zênite. O padrão de referência absoluto foi uma placa de espectralon branca. As amostras foram medidas em triplicatas, promovendo o aumento da superfície do solo escaneada e, em seguida, foram realizadas as médias das três curvas.

Estabelecimento dos limites de solos nas topossequências por método espectral

O método descrito a seguir utiliza uma técnica de classificação não supervisionada para agrupar os pontos amostrais e estabelecer os limites de solo, utilizando somente informações espectrais. Sendo assim, partindo do ponto mais alto (topo) para o mais baixo (base) das topossequências, a classificação

indicada pela técnica foi conferida; entretanto, onde houvesse mudança de um grupo para outro, seria estabelecido o limite da classe de solo.

Redução das informações espectrais para os pontos amostrais

As variáveis utilizadas para classificar as unidades de mapeamento, em cada ponto amostral, foram os comportamentos espectrais superficiais e subsuperficiais dos solos. No entanto, esses correspondem a um volume de informação muito grande, uma vez que cada curva espectral detém 2.151 bandas, perfazendo o total de 4.302 variáveis por ponto de amostragem. Sendo assim, foi necessário transformar os dados espectrais de cada ponto em um grupo de valores independentes, utilizando a Análise de Componentes Principais (ACP) (Wold, 1982). A compressão de informações para classificação numérica dos pontos amostrais se baseou em Campbell et al. (1970).

A técnica de ACP tem como princípio determinar a variabilidade dos dados, verificar quais as relações existentes de covariância dentro do conjunto de variáveis originais e reagrupar os dados originais de entrada em um conjunto novo e menor, por meio de transformações que geram novas variáveis (Crósta, 1993). Essa técnica executa uma longa série de operações matriciais, que se encontram detalhadas em Wold (1982).

Definição das unidades de mapeamento por Fuzzy k-médias

O principal objetivo de se aplicar uma técnica de agrupamento foi identificar amostras semelhantes, de acordo com seus atributos medidos. Um método de agrupamento que busca não somente identificar objetos semelhantes, mas também fornecer informações sobre como cada objeto classificado interage com os diversos grupos (*clusters*) existentes, é o *Fuzzy k-médias* (Bezdek et al., 1984). Nessa técnica, os objetos são reconhecidos como pertencentes em maior ou menor grau, a todos os *clusters*.

O valor que indica a relação entre um objeto (*i*) e o *cluster* (*k*) é conhecido como grau de pertinência (μ_{ki}). Cada elemento da matriz de dados estudada é definido por x_{ij} . *K* representa o número de *clusters*; e os centroides de cada *cluster*, B_{kj} .

O algoritmo inicia com um número pré-selecionado de *clusters*. Além disso, uma divisão inicial dos objetos é determinada (Equação 1), de forma que não haja agrupamento sem objetos e que os graus de pertinência para o objeto (*i*), em relação aos *clusters*, sejam definidos conforme equação 1.

$$\mu_{1i} + \mu_{2i} + \dots + \mu_{ki} = 1 \quad \text{Eq. 1}$$

O algoritmo procede calculando o centro de cada *cluster* (Equação 2):

$$B_{kj} = \sum_{i=1}^M (\mu_{ki})^m \cdot x_{ij} / \sum_{i=1}^M (\mu_{ki})^m \quad \text{Eq. 2}$$

em que m , $1 < m < \infty$, corresponde a um coeficiente, que pondera quanto o grau de pertinência influencia na métrica de distância empregada.

Em seguida, nova divisão dos *clusters* é definida, de acordo com os novos graus de pertinência (Equação 3):

$$\mu_{ki} = \frac{1}{\sum_{j=1}^N (x_{ij} - B_{kj})^2} / \sum_{k=1}^K \left(\frac{1}{\sum_{j=1}^N (x_{ij} - B_{kj})^2} \right) \quad \text{Eq. 3}$$

Dessa nova divisão, novos centros dos *clusters* são calculados, aplicando a equação 2, e o processo se repete até que o número de interações, pré-estabelecido ao programa, seja atingido ou que a variação do valor total do grau de pertinência não consiga ser reduzido.

Essa técnica foi repetida diversas vezes, dividindo-se os dados, de cada topossequência, de três a 15 grupos. Em seguida, para se estabelecer o melhor número de grupos para cada topossequência, aplicou-se o índice de desempenho (ID) dos agrupamentos (Xie e Beni, 1991).

Para o processamento da técnica *Fuzzy k-médias*, foi utilizado o pacote estatístico e1071 (Dimitriadou et al., 2008), implementado no programa R (R *Development Core Team*, 2008). Já o cálculo do ID foi realizado no pacote estatístico *Tiger* (Reusser, 2009). A divisão com menor valor do índice de desempenho foi considerada a melhor.

Ao final do processo, a classificação dos pontos amostrais foi avaliada, e o limite entre uma unidade de mapeamento e outra foi estabelecido no ponto amostral onde ocorria transição entre as classes *Fuzzy*.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Caracterização e classificação dos solos das topossequências estudadas

Os solos avaliados nos perfis pedológicos ao longo das topossequências, após interpretação das descrições morfológicas completas e análises químicas e físicas, foram classificados no segundo ao terceiro nível categórico do SiBCS (Embrapa, 2013). Foram caracterizadas oito classes de solos distintas: Latossolo Vermelho Férrico (LVf), Plintossolo Pétrico (FF), Nitossolo Vermelho Férrico (NVf), Nitossolo Bruno (NB), Nitossolo Háplico (NX), Argissolo Vermelho-Amarelo (PVA), Cambissolo Háplico (CX) e Gleissolo Háplico (GX).

Descrição do conjunto de dados estudados

A litologia da área é constituída por diabásio, argilitos e siltitos; conseqüentemente, ocorre pouca variação nos teores granulométricos das amostras

estudadas. A média do teor de argila foi 621,0 g kg⁻¹ (Quadro 1), e foram encontrados valores próximos a 807,0 g kg⁻¹, com coeficiente de variação (CV) de 19,9 %, demonstrando a predominância de solos com textura argilosa ou muito argilosa.

Os teores de matéria orgânica variaram de aproximadamente 2 a 62 g kg⁻¹. A média e o desvio-padrão (DP) dos dados foram, respectivamente, 20,1 e 9,32 g kg⁻¹, com CV de 46 %. O Al³⁺ constituiu média de 1,0 cmol_c dm⁻³, DP de 15,3 cmol_c dm⁻³ e CV de 153 %. A CTC apresentou média de 2,9 cmol_c dm⁻³, podendo ser considerada um valor baixo. O DP foi de 18,2 cmol_c dm⁻³, e os valores mínimo e máximo são, respectivamente, 3 e 154 cmol_c dm⁻³. O pH em água apresentou média de 5,2, e CV de 11,5 %.

Delimitação das unidades de mapeamento por método convencional vs. Espectral

Topossequência A

A topossequência A (Figura 2) apresentou boa variabilidade no relevo e nos solos, sendo encontrados Latossolos Vermelhos Férricos (LVf), Nitossolos Vermelhos Férricos (NVf) e Plintossolos Pétricos (FF), no topo e meia encosta. Os Nitossolos Brunos (NB), Argissolos Vermelho-Amarelos (PVA) e Cambissolos Háplicos (CX) localizam-se próximos ao sopé da encosta. A rampa apresenta comprimento de aproximadamente 800 m; a uma distância de aproximadamente 450 m do topo ocorre uma quebra de relevo, que perdura até 750 m (Figura 2). A partir desse ponto, a declividade reduz e nota-se aproximação do material de origem em relação à superfície do solo.

A determinação dos limites das classes de solos, de maneira geral, evidenciou-se similar para ambas as técnicas (Figura 2). As relações entre as classes de solos determinadas pelo método convencional e os grupos gerados pelo método espectral são indicados no quadro 2, que corresponde à matriz de confusão entre as classes de solos estabelecidas pelo método convencional (LVf, FF, NVf, NB, PVA, CX) e os grupos gerados pelo método espectral (1, 2, 3, 4), demonstrando a porcentagem de acertos entre ambos.

O grupo espectral 1 está relacionado às classes LVf, NVf e FF (Quadro 2), sendo os LVf predominantes (84,2 %). O NVf constituiu 10,53 % dos casos, e os FF, 5,26 %.

Os solos classificados como grupo 3 corresponderam em 50 % ao PVA; e nos outros 50 %, ao CX. O grupo 4 abrangeu tanto a classe NB (50 %) quanto CX (50 %). Observou-se que os Cambissolos presentes na área apresentaram comportamentos espectrais similares em relação aos Argissolos e Nitossolos Brunos.

No entanto, utilizando modelos estatísticos para predição de classes de solo, Nanni et al. (2004) encontraram resultados contrários ao deste estudo. Nesse caso, tais autores indicaram boa discriminação de Cambissolos em relação às outras classes de solos, em razão da maior variação nas classes de declividade da área avaliada.

Topossequência B

A topossequência B (Figura 3) apresentou a menor variabilidade de solos, sendo constituída predominante por Latossolos e Nitossolos. A ordem dos Cambissolos foi representada apenas por uma amostra, localizada no sopé da encosta próxima ao canal de drenagem. Os LVf encontraram-se no topo, enquanto os NVf distribuem-se pela meia encosta. Na sequência, são observados os NB; e, na parte mais baixa, observou-se um CX, esses derivados de rochas sedimentares.

Os resultados corroboraram os de Nanni et al. (2004) e Fiorio et al. (2010), os quais, aplicando análise discriminante às curvas espectrais de diferentes classes de solo, obtiveram ótima distinção entre indivíduos. As delimitações pelo método convencional e pela curva espectral apresentam grande concordância (Quadro 2). As amostras classificadas como grupo 1 representam 92,86 % de LVf e 7,14 % de NVf. Os grupos 2, 3, 4 e 5 relacionam-se, respectivamente, com as classes LVf, NVf + NB, NB e CX. A partir dos dados apontados, notou-se ótimo desempenho da técnica em distinguir diferentes solos e seus limites para a topossequência B.

Pela distribuição dos limites obtidos pelos espectros dos solos (Figura 3), a classe 2 encontrou-se

Quadro 1. Atributos analisados nas amostras de solo das topossequências estudadas

Parâmetro estatístico	Areia	Silte	Argila	MO	Al ³⁺	CTC	pH(H ₂ O)
Média	211,3	167,1	621,5	20,10	1,00	2,94	5,2
Desvio-padrão	76,3	11,9	123,5	9,32	1,53	1,82	0,6
Variação	740 ± 28	671 ± 3	807 ± 126	62,3 ± 2,2	9,98 ± 0,02	15,4 ± 0,3	7,4 ± 4,0
CV (%)	36,1	7,1	19,9	46,4	153,0	61,9	11,5

MO: matéria orgânica; CTC: capacidade de troca catiônica; e CV: coeficiente de variação.

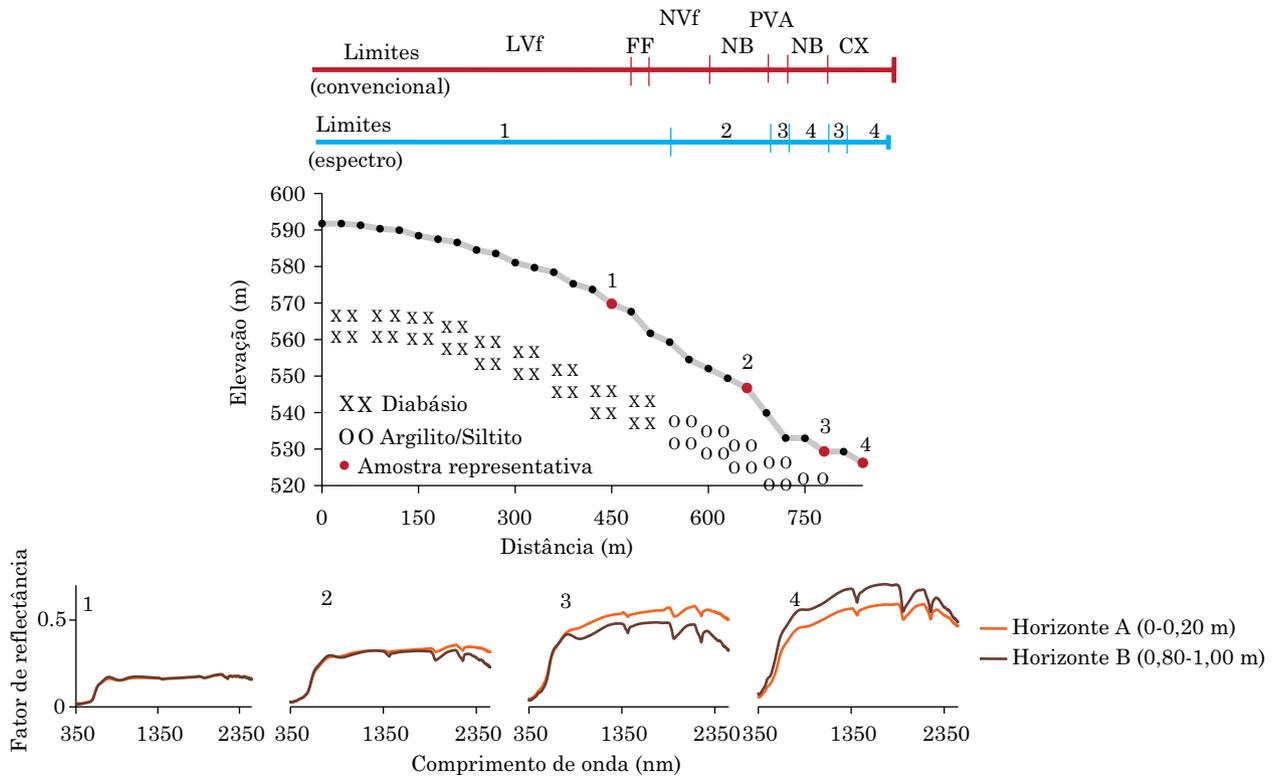


Figura 2. Toposequência A e limites de classes de solos determinados por métodos convencional e espectral. Os pontos 1, 2, 3 e 4 correspondem às amostras representativas às suas unidades espectrais (pontos em vermelho), evidenciando as curvas espectrais dos horizontes A e B.

cercada por amostras pertencentes à classe 1. Tendo em vista que nesse local o relevo é homogêneo, e de acordo com o levantamento de solos ocorrem somente Latossolos, o método evidenciou-se deficiente em separar classes de solos semelhantes, como o LVf e NVf. Essa situação se repete entre as classes 1 e 3, em um ponto localizado à aproximadamente 500 m do topo.

Toposequência C

Foram encontradas cinco classes de solo na toposequência C (Figura 4), sendo três pertencentes à ordem do Nitossolo; e as outras duas, dos Latossolos e Cambissolos (Figura 4). Por meio da técnica espectral, foram individualizados três grupos, que se evidenciaram distribuídos de maneira coerente e respeitando a variação do material de origem e relevo.

Os pontos amostrais classificados como grupo 1 corresponderam em 91,67 % à classe dos LVf, sendo os 8,33 % restantes relacionados ao NVf e NX (Quadro 2).

O grupo 2 é constituído basicamente pelo NVf, NX e NB, que correspondem a 83,33 % dos casos (Quadro 2), com ocorrência de pequena porcentagem (16,67 %) de CX entre os Nitossolos, demonstrando confusão pouco significativa da metodologia espectral em relação a estas classes de solo. As

classes de Nitossolos foram separadas em NB, NX e NVf, apresentando a capacidade da técnica em discriminar indivíduos com teores variáveis de ferro e coloração.

Avaliando curvas espectrais por método qualitativo, Demattê (1999) indicou boa distinção entre solos com alto e baixo teor de Fe e conseqüentemente com colorações distintas. O NB diferenciou-se do NX e NVf, entre outros fatores, pela cor mais brunada (Embrapa, 2013), concordando com Viscarra Rossel et al. (2006), que verificaram que as curvas espectrais são capazes de distinguir variações na coloração dos solos na faixa do visível.

A unidade espectral 3 apresenta-se constituída em 100 % por Cambissolos (Quadro 2). Nesse caso, ambos os métodos estabeleceram seus limites na toposequência muito próximos.

Toposequência D

Nessa toposequência observaram-se quatro classes de solos similares aos da toposequência C: LVf, NX, NB e CX. Os LVf localizam-se no topo, enquanto na meia encosta foram encontrados NX e NB e na baixada, CX. O método de agrupamento por dados espectrais foi capaz de detectar três limites na toposequência; esses se assemelhando aos delimitados pelo método convencional.

Quadro 2. Matriz de confusão entre os solos determinados pela classificação convencional e estabelecidos pelos grupos espectrais para amostras dos perfis de solos das topossequências A, B, C, D, e E

Classe convencional	Classe espectral				
	1	2	3	4	5
	%				
	Topossequência A				
CX	0,00	0,00	50,00	50,00	
FF	5,26	0,00	0,00	0,00	
LVf	84,21	50,00	0,00	0,00	
NB	0,00	50,00	0,00	50,00	
NVf	10,53	0,00	0,00	0,00	
PVA	0,00	0,00	50,00	0,00	
Total	100,00	100,00	100,00	100,00	
	Topossequência B				
CX	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00
LVf	92,86	100,00	0,00	0,00	0,00
NB	0,00	0,00	20,00	100,00	0,00
NVf	7,14	0,00	80,00	0,00	0,00
Total	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
	Topossequência C				
CX	0,00	16,67	100,00		
LVf	91,67	0,00	0,00		
NB	0,00	33,33	0,00		
NX	5,55	33,33	0,00		
NVf	2,78	16,67	0,00		
Total	100,00	100,00	100,00		
	Topossequência D				
CX	0,00	16,67	100,00		
LVf	91,67	0,00	0,00		
NB	0,00	33,33	0,00		
NX	5,55	33,33	0,00		
NVf	2,78	16,67	0,00		
Total	100,00	100,00	100,00		
	Topossequência E				
CX	0,00	0,00	0,00	100,00	100,00
GX	0,00	6,67	66,67	0,00	0,00
LVf	61,54	13,33	0,00	0,00	0,00
NB	0,00	6,67	0,00	0,00	0,00
NX	0,00	33,33	33,33	0,00	0,00
NVf	38,46	40,00	0,00	0,00	0,00
Total	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00

Ao avaliar os solos que constituem cada grupo espectral (Quadro 2), notou-se que no agrupamento 1, 91,67 % corresponderam ao LVf,

sendo 5,55 % representados por NX e 2,78 % por NVf. Tal como observado nas topossequências anteriores, a técnica não foi capaz de distinguir

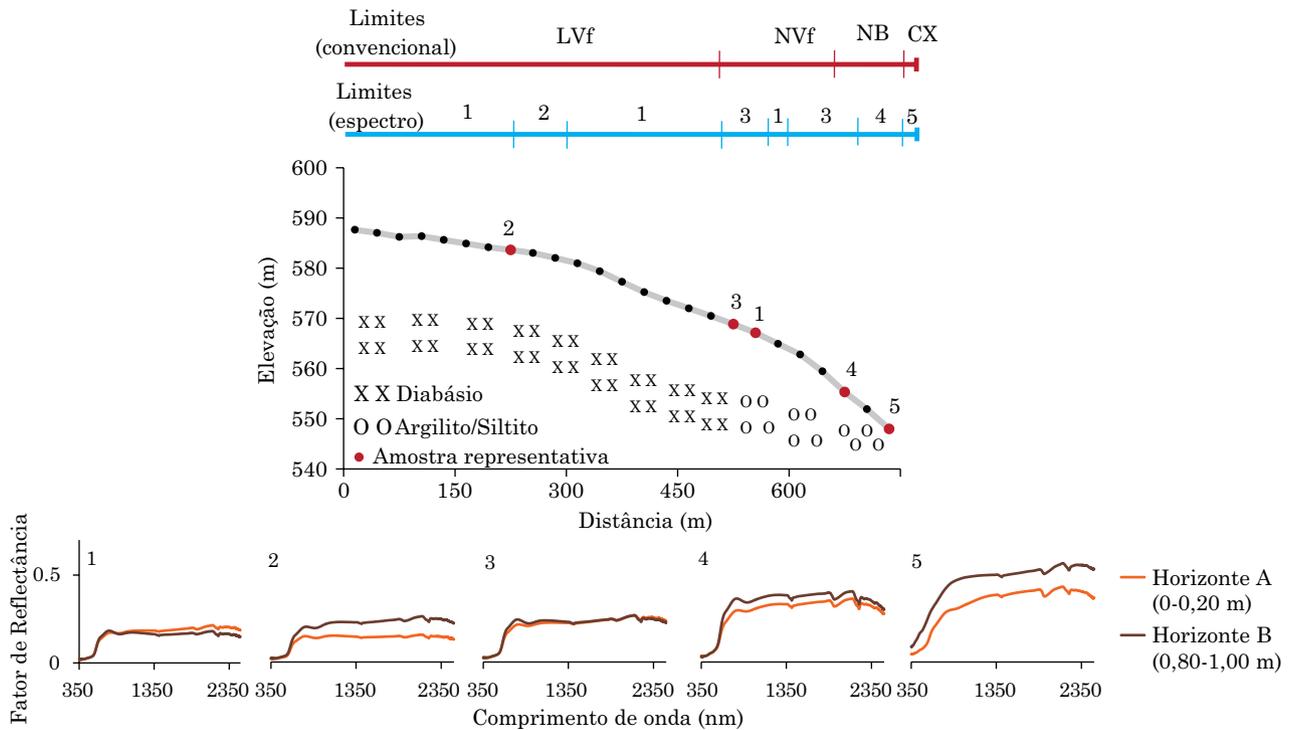


Figura 3. Toposequência B e limites de classes de solos determinados por métodos convencional e espectral. Os pontos 1, 2, 3, 4 e 5 correspondem às amostras representativas às suas unidades espectrais (pontos em vermelho), apresentando as curvas espectrais dos horizontes A e B.

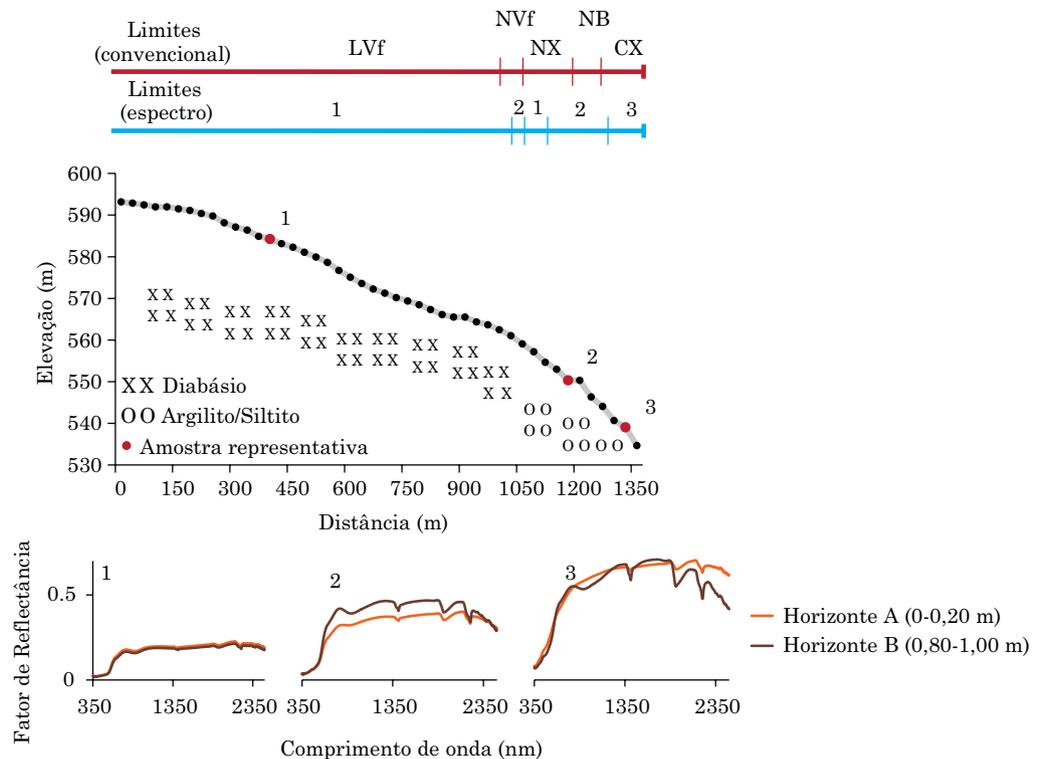


Figura 4. Toposequência C e limites de classes de solos determinados por métodos convencional e espectral. Os pontos 1, 2, e 3 correspondem às amostras representativas às suas unidades espectrais (pontos em vermelho), evidenciando as curvas espectrais dos horizontes A e B.

com clareza as ordens Latossolo e Nitossolo, particularmente Latossolos Vermelhos Férricos e Nitossolos Vermelhos Férricos.

A classe espectral 2, predominada por Nitossolos, apresentou individualização de NB, NX e NVf, além da ocorrência de 16,67 % de CX. Como discutido anteriormente, solos com colorações diferentes apresentam conformação diferenciada das suas curvas espectrais na faixa do visível (Demattê, 1999; Nanni, 2000); portanto, a técnica espectral é capaz de distinguir os Nitossolos.

O agrupamento 3 foi constituído somente por Cambissolos Háplicos, indicando a capacidade da curva espectral em distinguir solos jovens em relação aos mais desenvolvidos (Quadro 2).

Topossequência E

Entre todas, a topossequência E é a mais heterogênea, apresentando solos de quatro ordens distintas (Figura 5). Nessa topossequência, observaram-se solos altamente intemperizados, menos desenvolvidos e formados por hidromorfismo. Avaliando o relevo, é possível observar a presença de duas áreas mais elevadas, estando essas distantes entre si em 750 m (Figura 5). A área possui ainda um local de embaciamento, onde há estagnação da água e conseqüentemente ocorrência de solos

hidromórficos. Os solos rasos foram observados no final da topossequência, distantes do topo em torno de 1.000 m.

O estabelecimento de limites pelo método convencional gerou seis unidades de mapeamento, enquanto o método espectral apresentou somente cinco grupos (Figura 5). O resultado das técnicas foi semelhante na delimitação de solos como GX e CX; no entanto, o método espectral não foi capaz de detectar a mudança da classe LVf para NVf.

A confusão entre as técnicas é mais bem ilustrada no quadro 2, onde nota-se que o grupo 1 é constituído em 61,54 e 38,46 %, respectivamente, pelas classes LVf e NVf. Tal confusão ocorreu também nas outras topossequências. O grupo 2 é constituído em 80 % dos casos por Nitossolos; 13,3 %, por LVf; e 6,6 %, por GX, sendo esse o grupo mais heterogêneo. Entre os Nitossolos, houve ocorrência de NVf, NX e NB, estando, assim, em concordância com as outras topossequências avaliadas.

O agrupamento 3 está relacionado ao GX em 66,6 % dos casos e ao NX, em 33,3 %. Tendo em vista que o comportamento espectral dessas duas classes é distinto, tal confusão não era esperada. Por fim, as classes 4 e 5 apresentaram-se relacionadas somente aos CX.

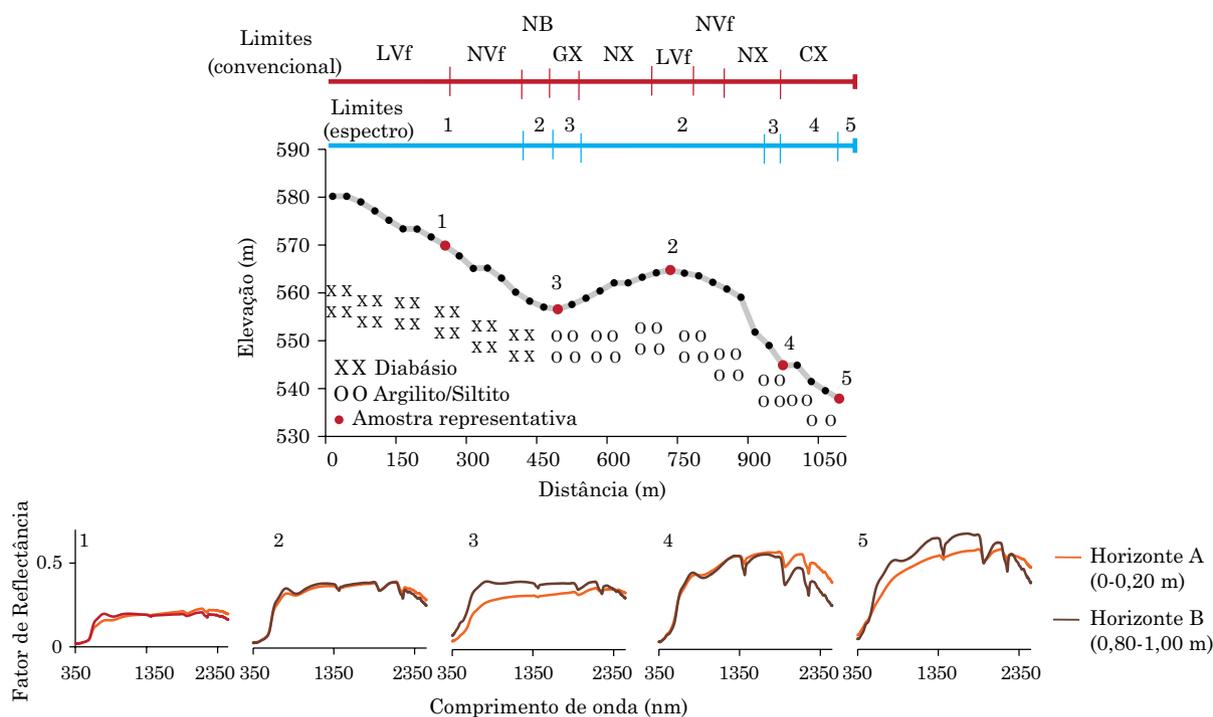


Figura 5. Topossequência E e limites de classes de solos determinados por métodos convencional e espectral. Os pontos 1, 2, e 3 correspondem às amostras representativas às suas unidades espectrais (pontos em vermelho), apresentando as curvas espectrais dos horizontes A e B.

CONCLUSÕES

O comportamento espectral dos solos nos comprimentos de onda do Vis-NIR, de maneira geral, foi capaz de diferenciá-los e estabelecer limites de classes de solos nas toposequências avaliadas, apresentando similaridades com o método convencional.

O Latossolo Vermelho Férrico e Nitossolo Vermelho Férrico, em alguns casos, não foram individualizados, indicando grande semelhança em seus comportamentos espectrais. Os Nitossolos de colorações diferenciadas, como NB, NX e NVf, foram delimitados, em razão das suas respostas espectrais diferenciadas na faixa do visível.

O comportamento espectral dos solos no comprimento de onda Vis-NIR distinguiu solos jovens de solos altamente intemperizados, indicando a capacidade da metodologia na individualização das classes correspondentes.

A metodologia apresentada pode ser utilizada como apoio em levantamentos pedológicos.

REFERÊNCIAS

- Almeida FFM, Barbosa O. Geologia das quadrículas de Piracicaba e Rio Claro, Estado de São Paulo. Rio de Janeiro: Divisão de Geologia e Mineração; 1953. (Boletim, 143).
- Andronikov VL, Dobrolvshiy GV. Theory and methods for the use of remote sensing in the study of soils. *Mapp Sci Rem Sens*. 1991;28:92-101.
- Base Aerofotogrametria e Projetos SA. Fotografias aéreas do município de Piracicaba, SP. 2008. Escala 1:35.000.
- Bellinaso H, Demattê JAM, Romeiro SA. Soil spectra library and its use in soil classification. *R Bras Ci Solo*. 2010;34:861-70.
- Bezdek J, Ehrlich R, Full WFCM. The fuzzy c-means clustering algorithm. *Comp Geosci*. 1984;10:191-203.
- Bregt AK, Bouma J, Jellinek M. Comparison of thematic maps derived from a soil map and from kriging of point data. *Geoderma*. 1987;39:281-91.
- Burrough PA, van Gaans P, Hootsmans R. Continuous Information classification in soil survey: Spatial correlation, confusion and boundaries. *Geoderma*. 1997;77:115-35.
- Camargo AO, Moniz AC, Jorge JA, Valadares JM. Métodos de análise química, mineralógica e física de solos do IAC. Campinas: Instituto Agrônomo de Campinas; 1986. (Boletim técnico, 106).
- Campbell NA, Mulcahy MJ, Mcarthur WM. Numerical classification of soil profiles on the basis of field morphological properties. Austrália. *J Soil Res*. 1970;8:43-58.
- Campos RC, Demattê JAM, Quartaroli CF. Determinação indireta do teor de hematita no solo a partir de dados de colorimetria e radiometria. *Pesq Agropec Bras*. 2003;38:521-8.
- Crósta AP. Processamento digital de imagens de sensoriamento remoto. Campinas: IG/Unicamp; 1993.
- Demattê JAM, Campos RC, Alves MC, Fiorio PR, Nanni MR. Visible-NIR reflectance for soil evaluation. *Geoderma*. 2004;121:95-112.
- Demattê JAM. Reflectância espectral de solos [Tese Livre Docência]. Piracicaba: Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz/Universidade de São Paulo; 1999.
- Dimitriadou E, Hornik K, Leisch F, Meyer D, Weingessel A. e1071: Misfunctions of the Department of Statistics (e1071), TU Wien, R package version 1.5-18, 2008. [Acessado em: 15 dez. 2013]. Disponível em: <http://cran.r-project.org/web/packages/e1071/index.html>.
- Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - Embrapa. Sistema brasileiro de classificação de solos. 3ª. ed. Rio de Janeiro: 2013.
- Environmental Systems Research Institute - ESRI. ArcGIS desktop developer guide [CD-ROM]. Redlands: ESRI Press; 2006.
- Fiorio PR, Demattê JAM, Nanni MR, Formaggio AR. Diferenciação espectral de solos utilizando dados obtidos em laboratório e por sensor orbital. *Bragantia*. 2010;69:453-66.
- Hutchinson MF. Development of a continent-wide DEM with applications to terrain and climate analysis. In: Goodchild MF, editor. *Environmental modeling with GIS*. New York: Oxford University Press; 1993. p.392-9.
- Jacomine PKT. É preciso investir na formação de novos pedólogos. *Bol Inf SBCS*. 1999;24:21-2.
- Nanni MR, Demattê JAM, Fiorio PR. Análise discriminante dos solos por meio da resposta espectral no nível terrestre. *Pesq Agropec Bras*. 2004;39:995-1006.
- Nanni MR. Dados radiométricos obtidos em laboratório e no nível orbital na caracterização e mapeamento de solos [tese]. Piracicaba: Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"; 2000.
- Oliveira JB, Prado H. Carta pedológica de Piracicaba. Campinas: Secretaria da Agricultura/Instituto Agrônomo de Campinas; 1989. escala 1:100.000.
- Oliveira VA. O Brasil carece de novos pedólogos. *Bol Inf SBCS*. 1999;25:25-28.
- R Development Core Team. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing. Vienna: 2008. [Acessado em: 16 dez. 2013]. Disponível em: <http://www.R-project.org>.
- Raij Bvan, Andrade JC, Cantarella H, Quaggio JA. Análise química para avaliação de solos tropicais. Campinas: Instituto Agrônomo de Campinas; 2001.
- Reusser D. Tiger: Analysing time series of grouped errors. R package version 0.1, 2009. [Acessado em: 20 dez. 2013]. Disponível em: <http://cran.r-project.org/web/packages/tiger/index.html>.
- Santos RD, Lemos RC, Santos HG, Ker JC, Anjos LHC, Shimizu SH. Manual de descrição e coleta de solo no campo. 5ª. ed. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo; 2013.
- Viscarra Rossel RA, Cattle SR, Ortega A, Fouad Y. *In situ* measurements of soil colour, mineral composition and clay content by vis-NIR spectroscopy. *Geoderma*. 2009;150:253-66.
- Viscarra Rossel RA, Walvoort DJJ, Mcbratney AB, Janik LJ, Skjemstad JO. Visible, near infrared, mid infrared or combined diffuse reflectance spectroscopy for simultaneous assessment of various soil properties. *Geoderma*. 2006;131:59-75.
- Wold H. Systems under indirect observation. Amsterdam: Elsevier; 1982.
- Xie X, Beni G. A validity measure for fuzzy clustering. *IEEE Trans Pattern Anal Mach Intellig*. 1991;13:841-7.